

**UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À TROIS-RIVIÈRES**

**MÉMOIRE PRÉSENTÉ À  
UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À TROIS-RIVIÈRES**

**COMME EXIGENCE PARTIELLE DE LA MAÎTRISE EN ÉLECTRONIQUE  
INDUSTRIELLE**

**PAR:**

**MAHER KAFFEL**

**LOCALISATION ET COMMANDE D'UN ROBOT MOBILE AUTONOME**

**NOVEMBRE 1991**

Université du Québec à Trois-Rivières

Service de la bibliothèque

Avertissement

L'auteur de ce mémoire ou de cette thèse a autorisé l'Université du Québec à Trois-Rivières à diffuser, à des fins non lucratives, une copie de son mémoire ou de sa thèse.

Cette diffusion n'entraîne pas une renonciation de la part de l'auteur à ses droits de propriété intellectuelle, incluant le droit d'auteur, sur ce mémoire ou cette thèse. Notamment, la reproduction ou la publication de la totalité ou d'une partie importante de ce mémoire ou de cette thèse requiert son autorisation.

*A mes parents...*

*A mon frère, ma soeur, son époux et sa fille ...*

*A mes amis ...*

*La blancheur qui surplombe ta terre ...,*  
*La verdure qui couvre ton corps...*  
*où deux bleux s'épousent ...*  
*le bleu du ciel ...*  
*et le bleu de la mer*  
***Tunisie ... je t'aime***

*" Ecoute ça", dit Ford, toujours plongé dans son prospectus publicitaire. "ils font tout un plat de l'électronique embarquée: la nouvelle génération de robots et d'ordinateurs de la compagnie Cybernétique de Sirius, équipés du tout nouveau dispositif P.H.V.".*

*- "Le dispositif P.H.V ? Qu'est-ce que c'est ?*

*- Oh ! C'est expliqué : Personnalité Humaine Véritable.*

*Une voix derrière eux énonça: "ça l'est effectivement." La voix, basse et désespérée, était accompagnée d'un léger bruit de ferraille. Se retournant, ils découvrirent un objet bonhomme d'acier qui se tenait, voûté, dans l'encadrement de la porte: Marvin.*

*"Quoi ? dirent-ils,*

*- Sordide, poursuivait Marvin. C'est le mot. Tout est sordide. Absolument sordide. Ne m'en parlez même pas. Tenez, regardez cette porte, leur dit-il en la franchissant. Les circuits d'ironie s'intercalèrent dans son modulateur vocal comme il imitait le style du prospectus: "Toutes les portes de cet astronef font montre d'une disposition d'esprit radieuse et enjouée. C'est leur plaisir de s'ouvrir et de se refermer pour vous avec la satisfaction que procure le travail bien fait."*

*Alors que derrière eux se refermait la porte, il apparut effectivement manifeste que c'était avec comme un soupir satisfait: Haaaammmmouiiii ! fait-elle.*

*Marvin la considéra avec un total mépris tandis que ses circuits logiques crépitaient de dégoût en caressant l'idée d'exercer contre elle des représailles physiques. D'autres circuits s'interposèrent, affirmant:*

*"Pourquoi s'en soucier ? Quel intérêt ? Rien ne justifie que l'on prenne parti." De nouveaux circuits s'amusèrent alors à faire l'analyse moléculaires des composants de la porte puis celle des cellules du cerveau de l'humanoïde. Pour faire bonne mesure, ils calculèrent vite fait le niveau du rayonnement de l'hydrogène dans le parsec cubique d'espace environnant avant de se déconnecter à nouveau, pleins d'ennui.*

*Un spasme de désespoir ébranla le corp du robot quand il se retourna. "Venez, grommela-t-il. J'ai reçu l'ordre de vous conduire à la passerelle. Regardez-moi: un cerveau de la taille d'un planète et tout ce qu'on me demande, c'est de vous conduire à la passerelle. Parlez-moi de satisfaction professionnelle ! Moi, je n'en vois pas."*

***"Guide du routard Galactique"***  
***Douglas Adams, Présence du Futur.***

---

# TABLE DES MATIÈRES

---

Liste des figures	vii
Liste des symboles	x
Résumé	xv
Avant-propos	xviii
<b>INTRODUCTION GÉNÉRALE</b>	<b>1</b>
<b>Chapitre I — Description fonctionnelle du robot mobile</b>	<b>9</b>
I. INTRODUCTION	9
II. STRUCTURE FONCTIONNELLE	10
II. 1 COMMANDE	11
II.1. 1 La locomotion	11
II.1.1.1 le suivi de trajectoire géométrique	12
II.1.1.2 Le guidage par balises	13
II.1.1.3 Le guidage par vision	13
II.1.1.4 Le guidage par ultrasons	13
II.1.2 La manipulation	13
II.1.3 Extension	14
II. 2 PERCEPTION	15
II.2.1 Natures des informations sensorielles	16

II.2.1.1	Les sensations proprioceptives	17
II.2.1.2	Les sensations extéroceptives	17
II.2.2	Acquisition de l'environnement	19
II.2.2.1	Par stéréovision	20
II.2.2.2	Par vision dynamique	20
II.2.2.3	Par télémétrie Laser	25
II.2.2.4	Par télémétrie ultrasonore	25
II.2.2.5	Par proximétrie	26
II.2.3	La localisation	27
II.2.3.1	La localisation absolue	29
II.2.3.2	La localisation relative	32
II.2.4	Sécurité-état	36
II.2.4.1	La sécurité active	36
II.2.4.2	Connaissance de l'état physique	37
II.3	ASPECTS DECISIONNELS	40
II.3.1	Modélisation de l'environnement et navigation	40
II.3.1.1	La modélisation géométrique	40
II.3.1.2	Modélisation topologique	41
II.3.1.3	Recherche de chemin	42
II.3.1.4	Modélisation sémantique	42
II.3.1.5	Recherche d'itinéraire	42
II.3.1.6	Génération de trajectoire	43
II.3.1.7	Navigation	43
II.3.2	Gestion des capacités du robot	43
II.3.2.1	Générateur de plan	44



II.3.2.2	Types de connaissances	44
II.4	COMMUNICATION	46
III.	CONCLUSION	47
<b>Chapitre II — Structures de commandes mises en oeuvre sur quelques robots mobiles</b>		<b>53</b>
I.	INTRODUCTION	53
II.	LES PRINCIPALES CONTRIBUTIONS	54
II.1	Le robot mobile SHAKEY	54
II.1.1	Description du véhicule	54
II.1.2	Système informatique	55
II.1.3	Système décisionnel	55
II.2	Le robot mobile JASON	57
II.2.1	Description du véhicule	57
II.2.2	Système Informatique	58
II.2.3	Système décisionnel	58
II.3	Le robot mobile du JPL "ROVER"	59
II.3.1	Description du véhicule	60
II.3.2	Système Informatique	60
II.3.3	Système décisionnel	60
II.4	Argos I	62
II.5	Yamabiko	63
II.5.1	Description du véhicule	63
II.5.2	Système Informatique	63
II.5.3	Système décisionnel	63
II.6	CART	64

II.6.1	Description du véhicule et du système informatique	64
II.6.2	Système décisionnel	64
<b>Chapitre III — Description du véhicule</b>		<b>68</b>
I.	INTRODUCTION	68
II.	DESCRIPTION DU VEHICULE	68
II.1	Le système de locomotion	71
II.2	Le système de perception	72
II.3	La structure informatique	76
II.3.1	Environnement des cartes de contrôle	77
II.3.2	La conception des contrôleurs	80
II.3.2.1	Le microprocesseur	80
II.3.2.2	Les périphériques	83
II.3.2.3	Implantation de la carte	85
<b>Chapitre IV— Modélisation &amp; schéma de contrôle</b>		<b>86</b>
I.	MODÉLISATION	86
I.1	Modélisation du véhicule	86
I.2	Modélisation de la mesure	89
II	SCHÉMA DE COMMANDE	90
II.1	Généralités	90
II.2	Le système de contrôle global	93
II. 2.1	Le planificateur de chemin global	93
II. 2.1.1	Description de l'algorithme	96
II. 2.2	Lisseur	106
II. 2.3	Planificateur local de chemin	107

II.2.3.1	Description de l'algorithme	109
II.2.3.2	Les contraintes de contournement d'obstacles	112
II.2.3.3	Tactiques de fin de contournement	114
II.2.4	Générateur d'états de référence (GER)	117
II. 2. 4.1	Génération de la vitesse de référence	118
II. 2.4.2	Génération de position et orientation de référence	119
II.2.5	Contrôleur du véhicule	123
II. 2.5.1	Contrôleur du suivi du chemin	124
II. 2.5.2	Contrôleur des unités de traction et de direction	126
<b>Chapitre V— Techniques d'amélioration de la localisation</b>		<b>127</b>
I.	INTRODUCTION ET POSITION DU PROBLÈME	127
II.	LES DIFFERENTES SOURCES D'ERREUR ASSOCIEES AU SYSTEME SENSORIEL	130
II.1	Les systèmes télémétriques Ultrasonores	130
II.2	Odométrie	139
II.3	Vision	140
II.4	Télémétrie par triangulation	140
II.6	Conclusion	141
III.	TECHNIQUES DE COMPENSATION	143
III.1	COMPENSATION DE L'EFFET DES ONDULATIONS ET DES RAMPES: Estimation du couple développé par le moteur d'entraînement	143
III. 1.1	Position du problème	143
III. 1.2	Mise en équations	144
III.1.2.1	Cas d'un mouvement sur un plan horizontal	144

III.1.2.2	Cas d'un mouvement sur une pente vers le haut	146
III.1.2.3	Cas d'un mouvement sur une pente vers le bas	147
III.1.3	Description de l'estimateur de couple	149
III.1.3.1	Mise en équations	149
II. 1.3.2	Estimation du couple	150
III. 1.3.3	Simulation et résultats	152
III.2	COMPENSER L'EFFET DE LA VARIATION DE LA CHARGE: Estimation des rayons des roues odométriques	154
III.2.1	Introduction	
III. 2.2	Mise en équations	
III.3	MÉTHODE DE COMPENSATION DE L'ERREUREN POSITION ET EN DIRECTION: recallage du robot mobile autonome	157
III.3.1	Introduction	157
III.3.2	Principe de la correction	158
IV.	FILTRAGE DE L'ETAT DU SYSTEME: Technique de filtrage non-linéaire	162
IV.1	Introduction et position du problème	162
IV.2	Description des filtres	164
IV. 2.1	Filtre de Kalman étendu (FKE)	166
IV. 2.2	Filtre du second ordre ( FSO)	168
IV. 2. 3	Filtre itératif de lissage linéaire (FILL)	169
IV. 3	Simulation et résultats	170
	<b>CONCLUSION GÉNÉRALE</b>	<b>177</b>
	<b>RÉFÉRENCES</b>	<b>180</b>

---

# LISTE DES FIGURES

---

Figure I.1- Moyens d'action	15
Figure I.2- Principe de l'odométrie	34
Figure I.3- Moyens de perception	39
Figure I.4-Moyens de décision	45
Figure I.5 - Exemple de diagramme fonctionnel	50
Figure I.6- Décomposition fonctionnelle du robot mobile	52
Figure II- Tableau récapitulatif des principaux travaux de recherche	66
Figure III.1- Structure du robot mobile	69
Figure III.2- Trace du véhicule au sol	70
Figure III.3- Système de traction et de direction	72
Figure III.4 Principe du télémètre à Ultrasons	74
Figure. III-5. Angle de vision du SONORE	75
Figure III.6 Structure informatique	78
Figure III.7 Dialogue de la carte de contrôle avec son environnement	79
Figure III.8- Structure interne du iAPX 188	81
Figure III.9 Répartition de l'espace mémoire	83
Figure III.10 Composants de la carte de contrôle	84
Figure IV.1- Coordonnées du robot mobile	88

Figure IV.2- Constitution générale d'un système robotique	90
Figure IV.3 Le système de contrôle global du véhicule	94
Figure IV.4- Technique de grossissement des obstacles	95
Figure IV.5-1 Différentes situations pour les obstacles à considérer	98
Figure IV.5-2 Obstacle détecté	99
Figure IV.5-3 Carte de l'environnement de travail du RM	100
Figure IV.5-4 Division de l'environnement en quatre (4) cadrans	102
Figure IV.5-5 Élimination d'obstacles par critère de distance par rapport au point de départ	103
Figure IV.5-6 Élimination d'obstacles par test de détection	104
Figure IV. 5-7 Exemple de trajectoires générées par l'algorithme	105
Figure IV.6- Principe du lisseur	106
Figure IV.7: Différentes unités du planificateur local du chemins	108
Figure IV.8- Contraintes appliquées au planificateur de chemin local	110
Figure IV.9- Procédure de contournement d'un obstacle par le robot	111
Figure IV.10- Cas critique ( $D_a = 0$ )	114
Figure IV.11- Tactiques de fin de contournement	115
Figure IV.12- Exemple de contournement d'obstacles généré par l'algorithme	115
Figure IV.13- Organigramme du contournement d'un obstacle	116
Figure IV.14- Exemple de profile de vitesse de référence générée	119
Figure IV.15- Contrôleur du véhicule	125
Figure IV.16- Erreur du chemin	126
Figure IV.17- Schéma de contrôle des moteurs de direction et traction	126

Figure V.1- Principe des robots mobiles	127
Figure V.2- Effet des perturbations: possibilité de collision	129
Figure V.3- Réflexion d'ondes sonores à partir d'une surface lisse perpendiculaire à l'axe acoustique	131
Figure V.4 - Les ondes sonores réfléchies ne sont pas détectées par le transducteur quand l'angle $\alpha$ est grand	132
Figure V.5- Cône d'émission des US	135
Figure V. 6- Incertitude directionnelle pour plusieurs obstacles à angle d'émission élevée du cône	136
Figure V.7- Nouveau problème d'incertitude	138
Figure V.8- Cas du déplacement horizontal ( angle d'inclinaison nul)	145
Figure V.9- Cas du déplacement le long d'une pente vers le haut	146
Figure V.10- Cas du déplacement le long d'une pente vers le bas	147
Figure V.11- Réponse de l'estimateur de couple	153
Figure V.12- Principe de la compensation de la variation de la charge	156
Figure V.13- Arrangement des plaques réfléchissantes et des sources	161
Figure V.14- Principe de la correction: type de trajectoire considérée	162
Figure V.15- Résultat de simulation du FKÉ	172
Figure V.16- Résultat de simulation du FSO	174
Figure V.17- Résultat de simulation du FILL	176

---

## LISTE DES SYMBOLES

---

$\theta_n, X_n$	Attitude du véhicule et les coordonnées du point milieu de l'axe des
et $Y_n$	deux roues sont à l'instant $t_n$
$\Delta\theta_r,$	Les variations, entre les instants $t_n$ et $t_{n-1}$ , de l'attitude et de la
$\Delta U_l$	distance parcourues respectivement par les roues gauche et droite
$k_d, k_g$	Constantes
$\delta_d$ et $\delta_g$	Déplacements de la suspension arrière gauche et droite du véhicule
$\Delta l$	Distance parcourue par le véhicule
$D_d, D_g$	Distances parcourues relatives à chaque impulsion issue de l'encodeur optique gauche ou droite
$\Delta l_d$	Distance parcourue relative à la roue droite
$\Delta l_g$	Distance parcourue relative à la roue gauche
$\hat{x}(k k)$	Estimé actuel de l'état
$\hat{X}$	Estimé optimal de l'état du véhicule
$\hat{b}$	Estimé
$\lambda:$	Longueur d'onde
$N_d, N_g$	Nombres d'impulsions générées dans une période de temps $T$
$r_d$ et $r_g$	Rayons effectifs des roues en utilisant
$r_{g^0}, r_{d^0}$	Rayons en état d'équilibre quand $\delta_g = \delta_d = 0$



$\Delta\theta$	Variation de l'orientation du véhicule
$v$	Vitesse du son dans l'air à une température ambiante
$(L_i, R_i)$	Coordonnées de ces plaques réfléchissantes dans le repère cartésien $(O, X_E, Y_E)$
$\alpha_c$	Direction de commande de la roue
$\alpha_c, \omega_c$	Les valeurs de la commande générées par le contrôleur du chemin
$\beta$	Angle d'inclinaison
$B$	Facteur d'amortissement
$B$	Gain du filtre
$B$	Matrice de la transformation de base
$C$	Décrit la position du véhicule par rapport au système de coordonnées de base
CC	Méthode des chemins continue
$C_i$	Paramètres de contrôle
CR	Point centre de rotation du véhicule
$\Delta\alpha$	Angle entre la direction de Dismin et la direction de Dismax
$D_c$	Distance critique pour la mesure
$D_d$	Distance qui sépare le robot du mûr de droite
$D_f$	$\text{Max} (D_g, D_d)$ lors de la phase de contournement
$D_g$	Distance qui sépare le robot du mûr de gauche
$D_{i\max}$	Distance dont la direction est voisine de celle de Dismax, $i=1,2$
$D_{i\max}$	Distance maximale mesurée
$D_{i\min}$	Minimum des trois distances centrales

$E_a$	État de référence antérieur, à l'instant $t$ , transformé dans le système de coordonnées dont l'origine est $(X_d, Y_d)$ . Son axe d'abscisse est aligné avec $\theta_d$
$E_d$	État du véhicule au début du segment. Elle est l'état à la fin du segment précédent
$E_e$	Transformée du vecteur $E_d$ dans le nouveau système de coordonnées
$E_f$	État du véhicule à la fin du segment en cours
$e_h$	Erreur d'orientation
$E_p$	Vecteur de position-orientation projeté sur le système de coordonnées $(X_d, Y_d)$
$e_t, e_n$	Les erreurs, tangentielle et normale, sur la distance parcourue
$e_v$	Erreur de vitesse
$f$	Fréquence de l'onde sonore
FILL	Filtre itératif de lissage linéaire
FKE	Filtre de Kalman étendu
FSO)	Filtre du second ordre
$F$	Force motrice
GER	Générateur d'états de référence
$G_r$	Gain multipliant la distance restante du point d'arrêt à atteindre
$i$	Courant dans l'armature
$I_{max}$	Indice de la direction $D_{imax}$
$K_e$	Constante de la force électromagnétique
$K_t$	Constante du couple
$K$	Gain de position

$l$	Longueur du trajet effectué par le robot la phase de contournement d'un obstacle
$L$	inductance
$\mu_k$	Séquence de bruit blanc
$p(X, Z)$	Densité de probabilité
PCG	Planificateur de chemin global
PCL	Planificateur de chemin local
$P_f$	Point distant de $W_1$ du point représentatif du véhicule
PP	Méthode du point-par-point
$P$	Point représentatif du véhicule
$P$	Variance de l'état
$\theta_m$	Orientation mesurée
$R'$	Transformation homogène décrivant la position relative du télémètre par rapport au véhicule
$r_c$	Rayon de courbure du segment de parcours
$\rho_0$	Coefficient de frottement
$R$	Résistance
RM	Robot mobile
$S_i$	Faisceaux
$T_d$	Couple de perturbation
$t_n$	temps
$u$	Entrée de commande
$u(k)$	Vecteur d'entrée
$v$	tension appliquée
$v_m$	Vitesse mesurée

$V_{\text{ref}}$	Vitesse de référence linéaire
$W_1$	Distance
$\mathbf{x}$	Position (x,y) du véhicule
$\nabla \mathbf{h}$	Jacobien de la fonction de la mesure $h$
$\nabla f$	Jacobien de la fonction de transition d'état $f$

---

# RÉSUMÉ

---

Dans le problème de guidage des robots mobiles, la manoeuvrabilité du système à commander est limitée par la présence d'obstacles dans le chemin de mouvement. Généralement, l'objectif désiré est formulé comme suit:

*"transférer un système dynamique donné d'un état initial  $I$ , à un état final  $F$ , tout en évitant tous les obstacles obstruant le chemin du mouvement";*

Lors de la génération, en temps réel, de chemins sans collision, l'effet de l'incertitude sur le système en boucle fermée doit être minimisé sinon éliminé. On peut facilement montrer comment de petites perturbations par rapport à une trajectoire nominale, peuvent entraîner une collision du RM avec un obstacle.

En fait, il y a deux sources d'erreur majeures dans le problème d'évitement d'obstacles:

- 1• La présence de la dynamique des actionneurs qu'on n'a pas, généralement, tenu compte lors de la formulation des équations décrivant le comportement du système. Il est très important de déterminer l'effet de la

dynamique des actionneurs sur le reste du système de sorte que le contrôleur puisse délivrer et fournir des performances nettement meilleures.

2• L'effet des erreurs de perception et de localisation. En effet, des informations de mauvaises qualités peuvent entraîner, non seulement de mauvaises performances mais aussi des collisions.

De tout ce qui précède, on voit qu'il est indispensable qu'une intervention auprès de la qualité de la localisation ainsi que de la perception prenne place avant qu'elle soit traitée par le contrôleur: C'est le but de ce travail.

On a commencer par examiner en détail les différentes sources d'erreurs qui peuvent gêner le bon fonctionnement du RM. Dans la deuxième partie on a introduit l'utilisation des techniques de compensation de l'effet de ces sources d'erreur sur le système.

On ne peut pas augmenter le concept d'autonomie pour notre robot mobile si on ne trouve pas un moyen pour améliorer la qualité des mesures. La cannaissance appropriée des différentes sources d'erreurs associées à ce système sensoriel nous permettra d'intervenir au niveau des capteurs afin de compenser l'effet des sources d'erreurs majeurs qui peuvent entraîner la dérive du robot et dégrader la qualité de contrôle du système global. C'est le cas de l'effet des ondulations et des pentes sur l'odométrie, adoptée par notre système, ainsi que de l'effet de la variation de la charge du robot.

- Afin d'améliorer la précision de la localisation du robot on peut faire recours à la technique de recallage qui consiste à mettre à jour, périodiquement, la

position du robot ainsi que son orientation par le biais d'équipements externes placés dans l'environnement pour servir comme référence pour le robot. Cette technique, par sa nature, s'oppose au concept d'autonomie du robot qui devient maintenant dépendant de l'existence et de l'absence de ces équipements. Il est vraie qu'à l'état actuel de la recherche on n'est pas capable de se surpasser de cette technique malgré son inconvénient majeur, mais on a pensé à diminuer la fréquence de cette correction ce qui veut dire augmenter l'autonomie du robot. Le moyen technologique qui s'est imposé est l'utilisation des techniques de filtrage non-linaire de l'état du robot afin d'en extraire le plus précis. Cette technique couplée avec les solutions précédentes de compensation de l'effet des irrégularités dans le sol et de l'effet des variation de la charge appliquée au robor permteront d'atteindre notre principal et secondaire objectifs à savoir:

- obtension d'un robot autonome,
- diminuer la fréquence de la correction périodique de la position.
- une autre solution qui s'avère nécessaire à adopter pour minimiser les inconvénients de chaque capteur pris isolément. Elle consiste à coupler les informations obtenues à partir de différents capteurs, qui fournissent chacun des informations naturellement complémentaires. De cette façon, on peut minimaliser l'influence des inconvénients de chacun d'eux pris isolément tout en valorisant leurs avantages.

---

# AVANT-PROPOS

---

Cette thèse présente la part la plus importante des travaux de recherche que j'ai effectués au sein du GRÉI de l'Université du Québec à Trois-Rivières.

Je tiens à exprimer plus particulièrement toute ma gratitude à Monsieur *Yves Dubé*, professeur au Département d'ingénierie, Directeur de la section de Génie Mécanique Manufacturier, pour avoir guidé l'évolution de mon travail et m'avoir permis par ses conseils et ses suggestions constructives de le mener à bien.

Je remercie aussi Monsieur *Andrzej Barwicz*, Directeur du comité des études avancées, pour les précieux conseils qu'il m'a prodigués tout au long de ce travail.

Mes remerciements vont aussi à Monsieur *Rajagopalan Venkatachari*, Directeur du GRÉI, pour ses conseils et les facilités matérielles qu'il m'a accordés.

Je voudrais témoigner tous mes remerciements, à tous les examinateurs pour avoir accepté de juger ce travail.



Un remerciement particulier va à Madame *Sylvie Garceau*, secrétaire de la section de Génie électrique, pour sa sympathie et ses précieuses aides.

La réalisation de ce travail n'a pu voir le jour sans un support financier. Je remercie Monsieur, *Abdelaziz Daoud*, Directeur de l'Ecole Nationale d'Ingénieurs de Sfax, pour m'avoir alloué une bourse d'études à l'étranger. C'est la bourse de la francophonie.

Je tiens à remercier tous les responsables de l'ACDI, de la Direction de la coopération internationale au Ministère de l'enseignement supérieur et de la science du gouvernement du Québec, et en particulier Monsieur *J.P. Broudehous*, Directeur, et Madame *Yveline Côté*, chargée du suivi pédagogique, qui m'ont accordé des conditions de travail idéales.

Je remercie également, Monsieur *André Thibault*, vice-recteur à l'enseignement et à la recherche, Monsieur *André Quirion*, Directeur de la coopération, Monsieur *Pierre Bergeron*, Directeur des services aux étudiants, Monsieur *Jean Lacoursière*, Responsable du service aux étudiants étrangers de l'UQTR., ainsi que Monsieur et Madame *Blili* pour leurs amitiés.

Enfin, mes remerciements vont à tous les membres de la communauté et en particulier, par ordre alphabétique, *Abdallah, Abdelfattah, Adel, Ahmed, Ben Slima, Chouhaïd, Ennaceur, Faiçal, Férid, Hamza, Hazem, Kaddouri, Khalid, Mansouri, Moufid, Mustapha, Nasreddine, Saad, Salim, Souhaïl*, et ceux que j'ai connu lors de mon séjour à Trois-Rivières.

---

# INTRODUCTION GÉNÉRALE

---

L'intérêt des robots mobiles a augmenté considérablement ces dernières années. Les hommes prennent conscience que certains travaux jusqu'alors effectués par l'être humain pourraient être réalisés par des machines dotées de moyens plus ou moins complexes selon le genre de travaux à réaliser. Ces travaux peuvent être pénibles, fatigants, dangereux ou irréalisables par l'homme. Citons en exemples ceux devant être exécutés dans les environnements hostiles dont l'air est irrespirable, dans les centrales nucléaires, dans l'espace, dans les océans, ou certains travaux répétitifs faisant peu intervenir les capacités intellectuelles de l'être humain. Diverses raisons ont contribué au développement de l'Intelligence artificielle et de la Robotique:

- du point de vue purement scientifique, les techniques et les méthodes ont mûri et se sont affinées;
- les besoins économiques, dans le cadre du mode de production capitaliste, poussant vers une augmentation du profit, l'amélioration de la productivité a

toujours été un impératif du fonctionnement du système. Ceci a été encore plus accentué par les crises économiques et la concurrence mondiale;

- pour des raisons diverses, la recherche de nouvelles sources d'énergie est devenue une nécessité. Or l'exploitation de ces sources est dans certains cas (forages pétroliers off-shore, énergie nucléaire) difficile voire dangereuse ou impossible pour l'homme et comporte certaines tâches non répétitives où des prises de décision sont nécessaires en fonction de la situation;
- La recherche de l'exploration spatiale a posé de manière claire les limites de l'intervention humaine directe;
- la recherche de systèmes d'aide aux handicapés continue de créer un besoin de prolonger artificiellement l'homme.

La réponse à ces nécessités fut tout naturellement la recherche de la réalisation de machines capables de remplacer, ou de prolonger intelligemment l'homme: Les robots.

Les progrès de la technologie dans divers domaines, ainsi que ceux accomplis dans l'étude des méthodes de base, rendent favorables les conditions de recherche pour la réalisation de ROBOTS COMPLETS.

Certains robots mobiles dit de deuxième génération sont déjà entrés dans l'industrie. Ils sont dotés de capacités de mouvement et de perception. Ils peuvent donc se déplacer dans un milieu donné tout en évitant certains obstacles. Ils effectuent des travaux répétitifs tels que balayer une salle, mais peuvent se sortir de situations imprévues telles qu'un obstacle sur le chemin

de parcours. Ces situations sont en tout cas relativement simples, et l'évitement ne se fait que dans des cas très particuliers où l'obstacle est isolé et a une forme simple. Dans des situations plus compliquées il s'avère indispensable de doter le robot d'un pouvoir de décision qui lui évite de faire appel à l'homme trop fréquemment.

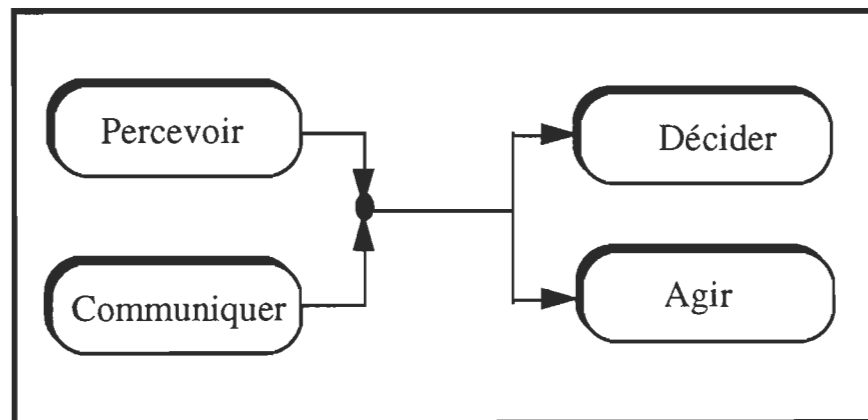
Le pouvoir de décision nécessite tout d'abord des capacités en perception assez développées. Le robot ne peut, dans certains cas, décider que s'il arrive à analyser son environnement et à se localiser par rapport à celui-ci. Il doit également posséder une mémoire plus ou moins grande selon les missions qu'il aura à accomplir.

Ceci nous amène à présenter les robots de troisième génération dotés de moyens de perception plus complexes et plus sophistiqués, et de moyens de décision qui les rendent plus »intelligents" donc plus autonomes dans des milieux relativement complexes. La mobilité du robot sera alors mieux maîtrisée. Il pourra se déplacer sans collision dans un environnement encombré d'obstacles. Ceux-ci peuvent être fixes et entièrement connus ou bien imprévus et de formes inconnues. Dans le premier cas, trouver une trajectoire permettant d'atteindre un but est du ressort de la Navigation. Celle-ci consiste à calculer un chemin permettant de joindre un but tout en évitant les obstacles connus. Ce chemin, comme nous le verrons par la suite, peut être constitué soit par une ligne brisée, soit par une succession de segments et d'arcs de cercles. Nous considérons la Navigation comme faisant partie des capacités décisionnelles. Dans le second cas un module d'Évitement d'obstacles

imprévu évite l'intervention humaine lorsqu'un obstacle imprévu "coupe la route " au robot.

Ce genre de robots dits de troisième génération est toujours du domaine de la recherche. Outre les possibilités d'application et d'utilisation de tels systèmes, leur étude constitue un but en soi puisqu'ils fournissent un support pour la recherche dans un large éventail de domaines touchant la robotique, tels que la génération de trajectoire, la communication, l'apprentissage, la commande, la perception multisensorielle.. et ce ci dans le cadre des contraintes physiques spécifiques de calcul temps réel et de limitation de coût, par exemple.

L'avenir de la robotique industrielle de troisième génération s'inscrit dans la perspective de robots capables de raisonnement, susceptibles d'interpréter leur environnement, et doués de diverses autonomies tant dans leur mobilité que dans l'exécution de tâches décrites selon un niveau d'abstraction élevé. Leur capacité de déplacement dans un univers en partie inconnu et évolutif passe par quatre fonctionnalités complémentaires:



Aujourd'hui, les développements en matière d'autonomie décisionnelle permettent de passer des robots à poste fixe et au rayon d'action réduit aux robots mobiles, capables d'étendre à l'infini leur zone de travail.

Certes les motivations d'une recherche sur les robots mobiles sont fondamentalement liées aux quatre fonctionnalités citées ci-dessus, mais encore faut-il que le support expérimental soit dans ce cas, outre les aspects préhension et manipulation, ceux propres à la locomotion.

De façon générale, on peut souligner que la recherche d'un accroissement de mobilité impose l'approfondissement de divers aspects essentiels tels que:

- mode de locomotion et de commande,
- autonomie vue sous l'aspect énergétique,
- structure mécanique,
- plans d'actions spécifiques.

Ces dernières années, les progrès très spectaculaires accomplis par la robotique ne concernent presque essentiellement que les robots manipulateurs qui sont en général fixes. Les raisons pour lesquelles les robots mobiles occupent une place modeste dans tous les secteurs de l'industrie où l'automatisation est déjà fort avancée sont multiples:

- Les robots manipulateurs se sont révélés efficaces pour rendre flexible cette automatisation. Leur domaine d'utilisation s'est progressivement élargi (soudage, peinture, assemblage ...) sans que se pose le problème de la mobilité.

- Les tâches liées à la mobilité ont d'abord été remplies par des convoyeurs ou des chariots avec chauffeurs, qui sont progressivement remplacés, à la faveur d'une réorganisation complète de l'usine ou de l'atelier, par des véhicules à guidage automatique (ateliers flexibles).

- La complexité des robots mobiles est la raison fondamentale de leur rareté. Les raisons précédentes ne sont que les conséquences de la dernière. Aux problèmes déjà ardues que posent les robots manipulateurs (mécaniques versatiles et fiables, capteurs performants aux informations simples et rapides à traiter, commande adaptative en temps réel ...), les robots mobiles ajoutent l'étendue de leur environnement qu'ils découvrent souvent au fur et à mesure de leur progression, la difficulté accrue du traitement en temps réel des informations issues de leurs capteurs due à leur vitesse et à l'évolution de leur champ de "*vision*", la détermination d'un *chemin optimal* qu'ils doivent suivre dans un monde souvent inconnu ou changeant, détermination qui met en jeu des concepts et des techniques propres à l'*intelligence artificielle*.

Cependant, l'intérêt des robots mobiles s'explique par les applications qu'ils peuvent avoir dans de nombreux domaines réputés dangereux ou inaccessibles, sans toutefois représenter un chiffre d'affaires aussi important que celui des manipulateurs. Il s'agit notamment de la maintenance et du dépannage des centrales nucléaires, de recherches et d'applications en milieu

sous-marin (ramassage d'échantillons rocheux ou de modules métalliques, pétrole, préparation des câbles téléphoniques) ou spatial (véhicules d'exploration de satellites ou de planètes, satellites artificiels ...), d'applications industrielles ( moisson, fenaison, traitement des vignes, arrachage des asperges ...) d'aide aux handicapés physiques et aux aveugles, de lutte contre les incendies

La présentation du présent mémoire s'articule en cinq parties:

Le premier chapitre dégage une décomposition fonctionnelle des robots mobiles ce qui permet d'aboutir à une compréhension plus aisée des problèmes liés à ce domaine de recherche.

Dans le second chapitre sont exposés les principaux travaux de recherche qui ont grandement contribué au développement des robots mobiles. Cette présentation touche les aspects locomotion, perception, commande et décision.

La synthèse des deux chapitres précédents amène, dans le chapitre 3, à définir la structure de notre robot mobile développé au GRÉI de l'Université du Québec à Trois-Rivières. Ce qui permettra de préciser le contexte de notre travail.

La modélisation et la structure de commande font l'objet du chapitre 4. On montre le principe de notre schéma de contrôle qui se présente sous une forme modulaire.

Le principal apport de ce travail est présenté au chapitre 5. Il consiste en l'amélioration de la précision de la mesure et de la localisation du robot



mobile. Après une brève description des différentes sources d'erreurs associées à notre système sensoriel, on présente des techniques de compensation des effets de certaines sources d'erreurs pour en finir avec la technique de filtrage non-linéaire qui permettra d'améliorer la précision de l'état du système afin d'obtenir un système-robot autonome.

---

# Chapitre I

## DESCRIPTION FONCTIONNELLE DU ROBOT MOBILE

---

### I. INTRODUCTION

L'exécution d'actions concrètes liées à la mobilité dans un environnement qui se veut le plus réaliste possible impose à tous les niveaux constitutifs d'un robot mobile une problématique très riche qui s'étend à d'autres thèmes comme l'analyse de scène ou la planification.

Cependant, un robot mobile doit aussi et surtout exister comme un "*tout*". C'est à dire disposer et utiliser toutes les capacités nécessaires à son usage, qui en premier lieu, s'appuie sur le déplacement. On peut aussi s'interroger désormais sur les fonctionnalités à intégrer au robot mobile, qu'il faut prendre conscience de leurs limites respectives et l'on doit accepter la non perfection de tout système, quelque soit.

Lorsqu'on a commencé à travailler dans ce domaine on s'est posé la question suivante: *Quel est le meilleur démarche à suivre pour comprendre au mieux le principe et les problèmes des robots mobiles ?*

Comme réponse à cette question, on a entrepris une démarche qui consiste en la décomposition fonctionnelle du système. C'est pourquoi on présente dans ce chapitre quelques éléments de synthèse sur l'architecture des robots mobiles. En effet, ceci est une description fonctionnelle bâtie sur les capacités dont les robots mobiles ont été (sont ou seront bientôt) dotés. Elle met l'accent sur la modularité et la hiérarchie qui simplifient la conception d'un ensemble aussi complexe.

## II. STRUCTURE FONCTIONNELLE

Si on regarde de plus près les différents robots mobiles existants ou ayant existés, on constate qu'un certain nombre de fonctions, au sens de capacités dont ils sont pourvus, se retrouvent dans la majorité d'entre eux.

Cette première constatation conduit au "*robot minimal*" et permet de dégager les fonctions essentielles pour un robot mobile de troisième génération. Nous relevons ainsi:

- ◆ *En perception* —
  - la localisation
  - l'acquisition de l'environnement
- ◆ *En décision* —
  - la navigation
- ◆ *En commande*—
  - la locomotion

La distinction de génération entre les robots mobiles est principalement contenue dans l'apport décisionnel de la fonction navigation. Toutefois, les robots incluent aussi un autre aspect qui contribue grandement aux capacités de décision : *c'est la génération de plan d'action et le contrôle de leur exécution.*

Pour aboutir aux fonctions nommées plus haut, il existe une diversité de solutions. Elles diffèrent par les capteurs employés ou les traitements qui sont mis en oeuvre. On va dans la suite présenter les techniques les plus importantes auxquelles il est fait recours et découvrir ainsi les éléments constitutifs des robots mobiles de troisième génération.

## **II. 1      Commande**

### **II.1. 1    La locomotion**

L'action de base que doit effectuer par essence un robot mobile est le déplacement, d'où la nécessité d'un système de locomotion chargé de la commande des actionneurs. Il en existe plusieurs, principalement conditionnés par la nature de l'environnement d'évolution.

Pour le déplacement sur une surface terrestre, on cite principalement:

- les roues
- les pattes
- les chenilles

*(d'autres techniques, copiées sur l'ingéniosité de la nature, sont aussi possibles comme la reptation par exemple).*

On ne rentrera pas dans les détails de la mise en oeuvre des chenilles puisqu'elles sont encore très peu répandues sur les robots de troisième génération.

Pour les pattes, le lecteur peut se référer à plusieurs travaux faits dans ce sens tels que [10].

En ce qui concerne les roues la solution la plus répandue comprend deux roues motrices indépendantes généralement implantées sur des moteurs à courant continu et une ou deux roues folles d'appui éventuellement directrices.

La commande associée est spécifique au type de locomotion. Pour les robots à roues, différents types d'asservissements du mouvement sont possibles selon les capteurs utilisés ( *on parlera de pilotage* ).

On en donne ici quelques exemples. On distinguera le fait que l'écart à la trajectoire s'exprime par un écart de position ou par un écart de perception d'éléments de l'environnement.

#### **II.1.1.1 le suivi de trajectoire géométrique**

L'objectif est de faire suivre au robot une trajectoire définie géométriquement par un ensemble de points immatériels (points d'échantillonnage, de lissage, d'approximation) en ayant connaissance de sa position dans le repère de référence de la trajectoire

Les techniques utilisées pour élaborer les lois de commande sont classiques en automatique et consistent à minimiser l'écart à la trajectoire de manière optimale.

#### **II.1.1.2 Le guidage par balises**

L'écart à la trajectoire est ici estimé à partir de la comparaison d'une perception de balises placées dans l'environnement avec les perceptions de référence attachées à la trajectoire à suivre.

#### **II.1.1.3 Le guidage par vision**

L'analyse d'une image de l'environnement du robot permet en s'appuyant sur des éléments caractéristiques d'estimer un écart de trajectoire qu'il faudra compenser par une commande appropriée des roues. Ceci met en oeuvre la localisation par vision dynamique.

#### **II.1.1.4 Le guidage par ultrasons**

L'asservissement est issu d'un écart de position relative mesuré par proximétrie ultrasonore. Dans ce cas, la trajectoire suivie est liée à l'objet perçu.

### **II.1.2 La manipulation**

L'autre action que l'on voudrait associer aux robots mobiles est la manipulation. Un certain nombre de robots ont ainsi été conçus pour supporter la présence d'un bras manipulateur (comme c'est le cas du présent travail), établissant ainsi la liaison entre deux systèmes robotiques étudiés bien

souvent de manière indépendante. Cependant, la problématique posée par un manipulateur embarqué n'en est qu'à ses débuts et les problèmes de couplage de cinématique et dynamique du robot mobile et du manipulateur sont loin d'être résolus.

Il en résulte qu'actuellement, la manipulation sur robot mobile est abordée de manière indépendante et n'est rattachée aux fonctions du robot mobile que par juxtaposition.

### II.1.3 Extension

D'autres actions sont envisageables pour les robots mobiles. Elles relèvent en général d'un domaine d'application particulier pour lequel le robot sera adapté. Il en est ainsi du nettoyage industriel, du travail agricole, de la surveillance, de la protection civile, du convoyage, etc .... On ne tentera pas de donner une liste des systèmes que l'on peut adjoindre au robot mobile.

D'une façon générale, on considère les actions autres que la locomotion comme des actions provenant d'un système indépendant rattaché au robot et constituant ce qu'on appellera la "*charge utile*". La coopération entre les deux systèmes se faisait à travers le niveau décisionnel.

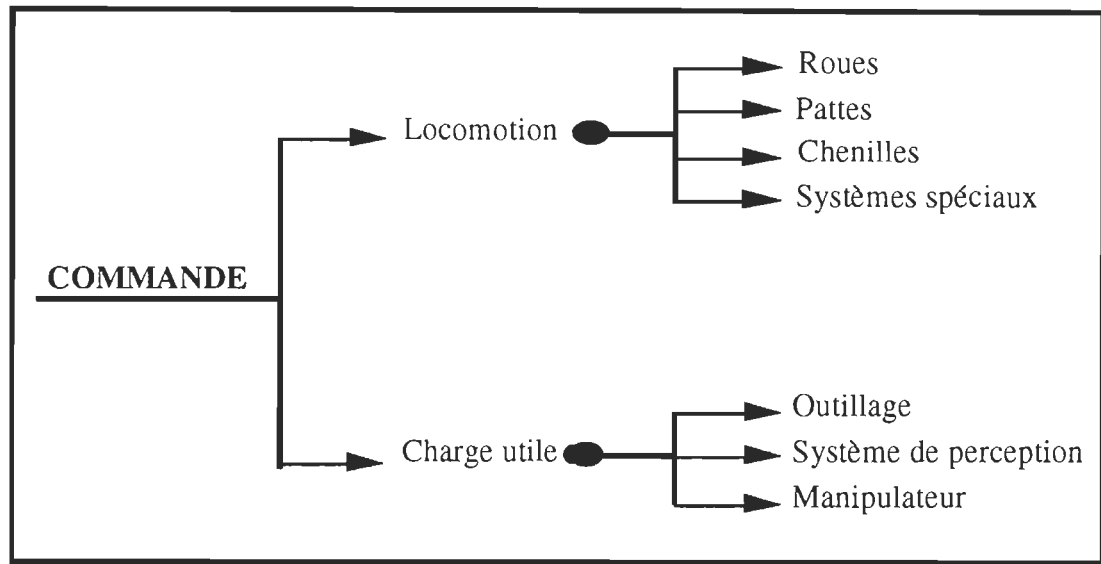


Figure I.1- Moyens d'action

## II. 2 Perception

En matière de robotique il est toujours fait référence à l'homme comme robot idéal du fait de ces capacités surprenantes d'adaptation et de réflexions avec son environnement d'évolution.

Le système nerveux, acteur principal du processus locomoteur, permet d'une part d'intégrer un ensemble de sensations (ou informations) d'origines et de natures très diverses issues de l'environnement dans lequel il évolue, et d'autre part de coordonner l'ensemble des parties participantes à la fonction locomotrice. Il permet un comportement *évolué* et *versatile* autorisant l'homme (ou l'animal) à *s'adapter* à des conditions souvent fortement variables ou perturbées.



La très grande *diversité* des informations sensibles susceptibles d'être traitées par le système nerveux, est à l'*origine* de la surprenante faculté d'*adaptation* au milieu d'évolution.

La perception est définie comme un ensemble de trois parties comprenant:

- *les capteurs*
- *l'extraction d'informations pertinentes*
- *leur interprétation*

L'information de perception est élaborée pour servir la mise en oeuvre des actions (*l'asservissement du mouvement en boucle fermée en est un exemple typique* ) mais aussi pour alimenter les mécanismes de décision (*choix d'une stratégie de déplacement, etc ...*). Ceci montre qu'elle est susceptible de prendre plusieurs formes selon l'usage à laquelle elle est destinée.

## **II.2.1 Natures des informations sensorielles**

On scinde généralement en deux types l'ensemble des sensations éprouvées:

### **II.2.1.1 Les sensations proprioceptives**

Elles prennent naissance au sein même de l'organisme et rendent compte de son état interne. Parmi les nombreuses informations proprioceptives, on peut citer celles utilisées pour les fonctions locomotrices:

- position, vitesse, accélération ...
- l'ensemble des contraintes auxquelles est soumis le corps
- l'état de fatigue de chaque élément participant à la locomotion
- etc ...

L'ensemble de ces informations proprioceptives est traité par des fonctions décentralisées du système nerveux et donne lieu à des activités réflexes.

### **II.2.1.2 Les sensations extéroceptives**

Elles sont généralement appelées sens et regroupent l'ensemble des informations par lesquelles l'organisme est renseigné sur certains éléments du milieu extérieur.

Ces sensations sont soit de nature physique (vue, audition, sensibilité à la pesanteur, toucher ...), soit de nature chimique (goût, odorat...). Contrairement aux informations proprioceptives permettant des régulations à très bas niveau, les informations extéroceptives sont reçues et traitées directement par le système nerveux central lorsqu'un organe de sens quelconque réagit à un stimulus extérieur. Parmi les sensations citées ci-

dessus, certaines sont d'une importance première lors du processus locomoteur:

- les informations visuelles permettent lors de la locomotion l'évitement d'obstacles fixes ou mobiles par la génération de trajectoires d'évitement spécifiques,
- les informations tactiles générée par la peau recouvrant l'organisme permettent une régulation de l'effort développé.

L'efficacité des déplacements observés au niveau de l'animal (et de l'homme), montre que l'exploitation, par l'organisme, des informations proprioceptives est faite directement et permet de générer des activités réflexes. Parallèlement, on note que seules les sens visuels permet des déplacements rapides, précis et économiques. En effet, par les retours d'informations qu'il constituent, ils apportent au processus locomoteur des effets de stabilisation d'une part et anticipateurs d'autre part permettant un comportement locomoteur optimal.

La nature et la complexité des capteurs conditionnent le type d'information qui sera recueilli. Or l'accroissement de l'autonomie du robot passe par une augmentation des capacités d'acquisition d'informations. La tendance actuelle est donc d'accroître le nombre des capteurs embarqués ( aspect quantitatif), d'améliorer leurs performances et possibilités, de diversifier leur nature ( aspect qualitatif), et parallèlement de construire des traitements sophistiqués capables d'extraire le maximum d'informations utiles en un

minimum de temps, que sauront exécuter des calculateurs de plus en plus rapides et réduits.

On regroupera la perception sur les robots mobiles au sein de trois classes de fonctions:

- la localisation
- l'acquisition de l'environnement
- la sécurité - état

Les deux premières font partie du "robot minimal". La dernière fonction est apparue en complément pour se prévenir des évolutions non maîtrisées du robot ou de son environnement. L'importance de cette fonction traduit paradoxalement l'aptitude du robot à affronter des situations de plus en plus réalistes et va donc dans le sens d'une plus grande autonomie, par la capacité de sentir le danger aussi bien externe qu'interne (dégradation, défaillances...).

On va désormais approfondir chacun des aspects liés à la perception en faisant apparaître un sous-ensemble d'unités fonctionnelles plus spécifiques.

### **I.2.2 Acquisition de l'environnement**

L'objectif de cette unité est de collecter des informations qui serviront à la création de modèles de l'environnement sur lesquels s'appuieront les capacités décisionnelles du robot mobile.

Cela peut être fait globalement, c'est à dire en s'appuyant sur une perception d'ensemble et à distance de l'environnement ( éventuellement enrichie de manière incrémentale lors de déplacements) pour en extraire un certain nombre de caractéristiques spécifiques (position des obstacles en mouvement, reconnaissance d'éléments de référence, ...).

On s'intéressera ici à l'obtention d'information 3D. On peut les obtenir à partir des différents systèmes de vision à base de caméra:

#### **II.2.2.1 Par stéréo vision**

De la vision d'une même scène selon deux points de vue différents, on peut déduire après la mise en correspondance des deux images obtenues, la mesure de la distance aux points perçus. Cette technique débouche sur un positionnement tridimensionnel.

#### **II.2.2.2 Par vision dynamique**

Une séquence d'images est prise au cours du déplacement du robot. La comparaison d'une image avec un modèle prédictif issu de la connaissance des paramètres du mouvement fait apparaître les caractéristiques d'éléments de l'environnement.

On peut ainsi accéder directement à la mesure des distances du robots aux objets qui l'entourent par télémétrie; ceci conduit en plus à une perception de l'environnement.

En effet, dans la vision humaine, il a été montré récemment l'existence d'un effet particulier du mouvement sur la surface rétinienne de l'oeil: le *flot optique*.

Basés sur les remarques effectuées par les neurophysiologues, des travaux très intéressants ont été réalisés par S. Ullman, K. Parzdney et par B.K.P. Horn et *al.* , pour établir les liens qui existent entre le mouvement apparent d'une caractéristique sur la surface rétinienne et son mouvement réel dans l'espace tridimensionnel.

Ainsi, au mouvement relatif d'un observateur dans un environnement, correspondent sur la surface rétinienne des phénomènes liés à la variation du gradient de luminosité et aux effets de perspective de la scène perçue.

Ceci est dû à l'existence de cellules nerveuses spécialisées dans le calcul du mouvement associé à ces variations. Ces cellules sont sensibles à l'orientation et à l'intensité d'un élément caractéristique de la scène sur la rétine et exploitent les informations contenues dans un champ vectoriel dense représentant des projections des vitesses instantanées des objets associés à ces caractéristiques. Ce champ de vecteurs est appelé *flot optique*.

Cette vision dynamique opère pendant le déplacement planifié. Elle utilise deux types d'informations:

- la connaissance a priori de l'univers formé par le système d'acquisition,
- la connaissance a priori de la trajectoire fournie par le système de pilotage.

Elle réalise le suivi sur une séquence d'images de caractéristiques visuelles extraites de celles-ci et choisies en fonction des informations a priori. Leur acquisition lui permet:

- *d'acquérir des informations incrémentales sur l'état de l'environnement en notant les évolutions de caractéristiques du modèle,*
- *de détecter éventuellement l'apparition d'objets nouveaux mobiles ou fixes et,*
- *de contrôler le mouvement du robot en corrigeant sa dérive éventuelle par rapport à l'environnement.*

De ce fait, la vision dynamique apporte quelques remèdes aux autres techniques déjà adoptées en robotique mobile:

- La perception du robot à l'aide des télémètres ( Laser, Ultrasonique ou Infra-rouge ...) est aveugle entre deux étapes de perception, et la surveillance de l'environnement par ultrason est insuffisante car elle est pauvre et n'est active que dans un domaine proche du robot.

- L'univers d'évolution est modélisé par la trace au sol des objets polyédriques. Or, dans un environnement quelconque, des objets peuvent avoir une base plus ou moins importante par rapport à celle donnée par la perception azimutale du télémètre Laser.

Ces deux remarques nous font apparaître la nécessité d'un enrichissement de l'analyse d'une scène à modéliser. En effet, la vision

tridimensionnelle telle que la stéréovision passive ou active est un moyen sensoriel riche dans la mesure où elle permet d'avoir une information qualitative et de détail ( texture, notion de régions, notion de discontinuités, de semi-occlusions, etc ...) sur des objets quelconques d'une scène.

Une stéréovision passive par exemple, permet, avec un dispositif mécanique pas trop compliqué, de collecter des données 3D d'un univers très général. De plus, si l'on conçoit l'interaction avec un télémètre laser pour affiner les mesures incertaines, la précision des données recueillies peut être améliorée. On peut, en faisant coopérer les deux systèmes, décrire l'environnement avec une précision correcte. Ces informations permettent la construction des modèles nécessaires à la navigation, à l'identification des objets et enfin permettent de faire une analyse de scène de haut niveau.

La modélisation d'un environnement qui n'est pas toujours stationnaire (présence d'objets mobiles nécessitant de réagir assez vite) serait, dans le cas idéal, réalisée par un système opérant en temps réel et même pendant que le robot se déplace. Cependant, la stéréovision nécessite la mise en oeuvre d'algorithmes très complexes. Par conséquent, vu le temps de calcul exigé pour l'acquisition et la modélisation d'une scène tridimensionnelle, il est actuellement quasiment impossible de penser à son fonctionnement "en temps réel" de coût raisonnable. La perception par stéréovision est pour l'instant utilisée en position d'arrêt du robot. Ce dernier fait une scrutation panoramique de son univers, puis modélise la scène perçue et planifie la trajectoire d'évolution entre deux points atteignables de cette scène. Le problème évoqué ici reste donc entièrement posé:



Entre deux étapes d'acquisition , c'est-à-dire entre deux point d'arrêt, le robot est presque entièrement aveugle. Il dispose de la seule surveillance de l'environnement immédiat par ultrasons, ce qui lui permet de détecter et contourner les objets fixes.

Un autre problème important est celui de la perte d'information liée au déplacement. Pour estimer sa dérive, le robot utilise un système odométrique qui nécessite un recalage absolu et qui peut par conséquent introduire des erreurs cumulatives.

On assignera à la vision dynamique trois fonctions essentielles qui permettront de compléter au mieux un système de perception 3D pour un robot mobile:

- Fonction de surveillance: un objet mobile inconnu et imprévu peut apparaître devant le robot,
- Fonction de localisation et de recalage du robot par rapport à des éléments fixes de l'environnement: le robot peut dériver d'une façon régulière par rapport à l'environnement sans que le système odométrique ne puisse le percevoir ( le dérapage par exemple ...) et la localisation peut être faussée, une vision dynamique peut recalculer continuellement l'odomètre et de ce fait son erreur ne sera plus cumulative,
- Fonction d'aide à la modélisation 3D: les incertitudes du modèle peuvent venir des objets partiellement occultés, leur dévoilement pendant le déplacement peut être perçue par la vision dynamique. Un autre niveau de

coopération peut être l'information de prédiction qui permet de réduire la combinatoire du processus d'apprentissage du système de stéréovision.

Les trois fonctions citées sont réalisées à partir du suivi d'images et en utilisant les informations issues du modèle à priori et du mouvement comme contrainte.

### **II.2.2.3 Par télémétrie Laser**

La mesure du temps de vol mis par une impulsion pour atteindre un objet et se réfléchir sur un récepteur donne la distance d'un point de l'objet. Il est aussi possible d'émettre en continue un signal laser modulé et de mesurer le déphasage avec le faisceau renvoyé par l'objet.

### **II.2.2.4 Par télémétrie ultrasonore**

Le principe est identique au laser. Toutefois, la propagation des ultrasons dans le milieu aérien limite leur usage à des portées de quelques mètres tout au plus. C'est-à-dire un ordre de grandeur en dessous de la télémétrie laser. En outre, les faisceaux engendrés par les émetteurs utilisés par cet usage (type électrostatique) ont une ouverture minimale encore importante de l'ordre de 15 degrés qui entraîne une incertitude importante sur la position exacte du point de mesure et ils souffrent de la réflexion spéculaire propre à leur faible longueur d'onde. Il n'en reste pas moins que leur mise en oeuvre est simple et leur coût est réduit.

Dans tous les cas, par principe, la mesure de type télémétrique est très localisée. La perception globale est alors acquise par balayage du faisceau en

azimutal et / ou en site de sorte que l'ensemble des points de mesure collectés soit suffisant pour dégager par traitement (segmentation, approximation polygonal, ou autres ...) les structures qui conduisent à un modèle géométrique.

#### **II.2.2.5 Par proximétrie**

L'analyse globale de l'environnement requiert l'acquisition et le traitement d'un nombre important de mesures et devient donc parfois coûteuse en temps. Il apparaît intéressant de pouvoir se préoccuper dans certaines situations et pour des objectifs particuliers, d'une partie limitée de l'environnement à la perception locale qui nécessite la proximité de l'environnement à percevoir mais qui permet en général un accès plus direct à l'information pertinente dans la mesure où le nombre des données manipulées se trouve nettement réduit. On trouve ici la proximétrie:

##### **a) par ultrasons**

Elle est obtenue par une ceinture de capteurs à ultrasons ou par un capteur tournant.

L'usage de transducteurs piézo-électriques conduit à des distances de mesure de l'ordre de 1.5m avec des couvertures de faisceau atteignant 30 degrés et plus.

Ces capteurs sont donc propices à une couverture ( espace où une mesure est possible) de l'environnement immédiat du robot et à la détection de collisions imminentes. Toutefois, par la corrélation de plusieurs mesures,

une modélisation réduite des objets perçus est possible (détermination de caractéristiques géométriques), locales simples comme l'orientation ou la position relative par exemple, et est utilisable par les déplacements relatifs.

### **b) par optique**

Dans ce cas on utilise des diodes Infrarouges ou un balayage laser des environs immédiats du robot.

### **c) par le contact**

Un système mécanique renvoie une information sur la présence et la position relative présumée d'un objet touché. Une stratégie de déplacement pourrait aboutir à partir de cette information grossière.

Il existe bien d'autres moyens susceptibles d'apporter une information sur l'environnement que nous n'avons pas abordé tel que l'utilisation d'un radar, mesures d'efforts ...

On va maintenant s'intéresser au deuxième apport de la perception qui est la localisation.

## **II.2.3 La localisation**

Un robot mobile est conçu essentiellement pour se déplacer dans un univers occupé d'objets. La partie précédente nous a montré qu'il existait divers moyens de percevoir l'environnement, et on verra plus loin qu'il est possible d'en extraire des modèles plus ou moins abstraits. Il s'avère maintenant indispensable de réaliser l'opération duale, c'est-à-dire permettre

au robot de se situer par rapport aux éléments de son environnement, ne serait-ce que pour contrôler son déplacement ou définir ses objectifs.

Au début de leur naissance les robots mobiles actuellement utilisés en industrie sont astreints à suivre un fil enterré ( filoguidage) ou une piste peinte au sol ( optoguidage). Les trajets que peuvent emprunter ces RM sont figés et leur conduite est assurée par un poste central chargé de gérer les aiguillages et la sécurité. Cette solution a pour conséquence d'imposer une infrastructure au sol coûteuse et assez difficile à reconfigurer. Pour de petites installations (quelques chariots) le coût de cette infrastructure rapporté au nombre de chariots, devient prohibitif, ce qui limite la diffusion de tels matériels. C'est pourquoi, il semble nécessaire d'alléger cette infrastructure, voir de la supprimer totalement, en dotant chaque chariot , que l'on pourra qualifier de robot, d'une large autonomie de localisation, de guidage et de décision, lui permettant ainsi d'atteindre le but qui lui est fixé sans avoir à suivre un trajet matérialisé au sol.

Dans cette section on va faire un balayage des différents systèmes de localisation qui sont adoptés pour localiser un robot mobile. En fait, l'exécution d'une trajectoire prédéterminée pose le problème essentiel de la localisation c'est à dire de la connaissance par le véhicule de ses coordonnées et de son attitude, définie comme l'angle que fait un axe du chariot avec un axe de référence lié à l'environnement. La connaissance de ces trois paramètres est indispensable pour guider le robot et le situer par rapport aux obstacles. On peut classer les méthodes de localisation en deux types à savoir la localisation absolue et la localisation relative.

### **II.2.3.1 La localisation absolue**

Ce type de localisation donne les coordonnées, et éventuellement l'attitude, du véhicule, mesurées par rapport à des points ou à des surfaces qui occupent des positions connues ou fixes dans l'univers du véhicule. Ces positions de référence peuvent être celles de dispositifs artificiels placés par l'utilisateur dans le seul but de résoudre le problème de localisation (balisage de l'environnement), ou bien de celles des obstacles eux mêmes.

Le balisage de l'environnement peut être réalisé à l'aide d'émetteurs, de récepteurs ou de réflecteurs de lumières, ou bien utiliser d'autres supports physiques telsque les ondes HF, des marques peintes sur le sol ou sur le véhicule.

Les expérimentations menées ont montré que l'on pouvait considérer comme résolu le guidage d'un robot mobile dans un environnement connu, à condition de pouvoir le localiser par rapport à un repère absolu (atelier par exemple ...); en effet, toutes les méthodes relatives, telles que l'odométrie ou la localisation inertielle des missiles et des avions, par exemple, nécessitent un recalage périodique.

Plusieurs systèmes, basés sur le marquage de l'environnement par des balises, ont été expérimentés pour obtenir cette localisation absolue, mais ils nécessitent une préparation adéquate de cet environnement et dans la plus part des cas, la prise en compte du masquage éventuel de ces balises par les obstacles.

C'est pourquoi, il y a d'autre méthodes de localisation absolue utilisant les obstacles cylindriques eux-mêmes comme balises et des données télémétriques fournies par un télémètre laser panoramique dont est équipé le véhicule. Il y a cinq méthodes applicables à des obstacles définies quelconques.

La première méthode divise l'espace libre à la circulation du robot en cellules caractérisées par des paramètres de vision presque invariants. Les 3 méthodes suivantes utilisent des algorithmes de corrélation avec différents critères de coïncidence. La dernière méthode, appelée "densité de présence", estime, à partir de chaque mesure télémétrique, une position possible pour le robot et fait la moyenne de toutes les positions possibles pour obtenir la localisation la plus probable.

La précision donnée par toutes ces méthodes de localisation absolue est identique, mais du point de vue temps de calcul, la méthode de modélisation par grille nécessite plus de temps pour modéliser l'environnement. Cette modélisation est faite une fois pour toutes pour un environnement donné. Parmi les quatre autres méthodes, celle d'épaississement d'obstacles est de loin la plus longue. La méthode de modification des points d'échantillonnage de la vue et celle de la densité de présence sont équivalentes quant à leur rapidité, mais la dernière est préférable, car elle est moins sensible au bruit. Notons que seule la méthode de grille donne l'attitude du véhicule.

### **a) la triangulation par balise**

La perception de balises actives comme des émetteurs de lumières, ou des émetteurs radio susceptibles d'être identifiés et/ou localisés ou plus simplement de balises passives ( bandes réfléchissantes, marques au sol, ...) conduit, par un calcul particulier, à la position et à l'orientation du robot de manière relative ou absolue selon la localisation des balises. Cette technique classique nécessite un aménagement de l'environnement (pose et visibilité des balises en tout lieu) qui ne va pas toujours dans le sens de l'autonomie.

### **b) la mise en correspondance de modèles**

Elle réalise à partir d'une analyse de l'environnement un appariement du modèle obtenu avec un modèle de référence acquis auparavant, portant sur des caractéristiques particulières et déterminant la transformation qui conduit à l'attitude du robot.

On accède de cette manière à la localisation absolue avec des modèles obtenus par télémétrie ultrasonique ou par télémétrie laser.

L'utilisation de l'acquisition locale débouche pour sa part sur la localisation relative.

Une information de contact, ou issue d'un système proximétrique, permet de situer le robot par rapport aux objets proches et perçus.



Cette méthode de localisation, généralement plus rudimentaire que celle décrite plus haut, est directe. Elle s'avère toutefois, suffisante pour conduire l'exécution de mouvement particuliers.

Ceci est ainsi réalisé pour l'évitement d'obstacle où le suivi de paroi de proximètre à ultrasons, ou encore par contact.

La deuxième solution suppose que le robot dispose en mémoire d'une carte de l'environnement qu'il peut comparer à celle vue par ses propres capteurs. Le robot doit donc être doté d'organes de "vision", qui peuvent être une ou plusieurs caméras, un télémètre infrarouge, laser ou ultrasonore.

### **II.2.3.2 La localisation relative**

Les systèmes de mesure relative estiment la position instantanée du robot en calculant les variations des coordonnées depuis un instant antérieur. Ces variations peuvent être obtenues à partir de mesures d'accélération (systèmes inertiels) ou de mesures des déplacements des points de contact avec le sol des points du chariot (odométrie). Dans tous les cas, les systèmes relatifs procèdent par intégration: les erreurs sont donc cumulatives, ce qui limite leur emploi à l'estimation à court terme de trajectoires.

#### **a) Odométrie**

Une autre méthode d'estimation de la position relative est basée sur le principe de l'odométrie et se trouve équiper la majorité des robots mobiles. Cette technique, qui repose sur l'intégration de déplacements élémentaires en

translation et rotation d'un mouvement plan, permet d'établir la position et l'orientation du robot dans ce plan en référence à une position d'origine.

Pour obtenir les variations des coordonnées du véhicule, l'odométrie procède par intégration de déplacements élémentaires. Dans ce but, on utilise les informations délivrées par les encodeurs optiques liés aux deux roues folles (libres) du véhicule. Le principe de l'odométrie est illustré par la figure I. 2

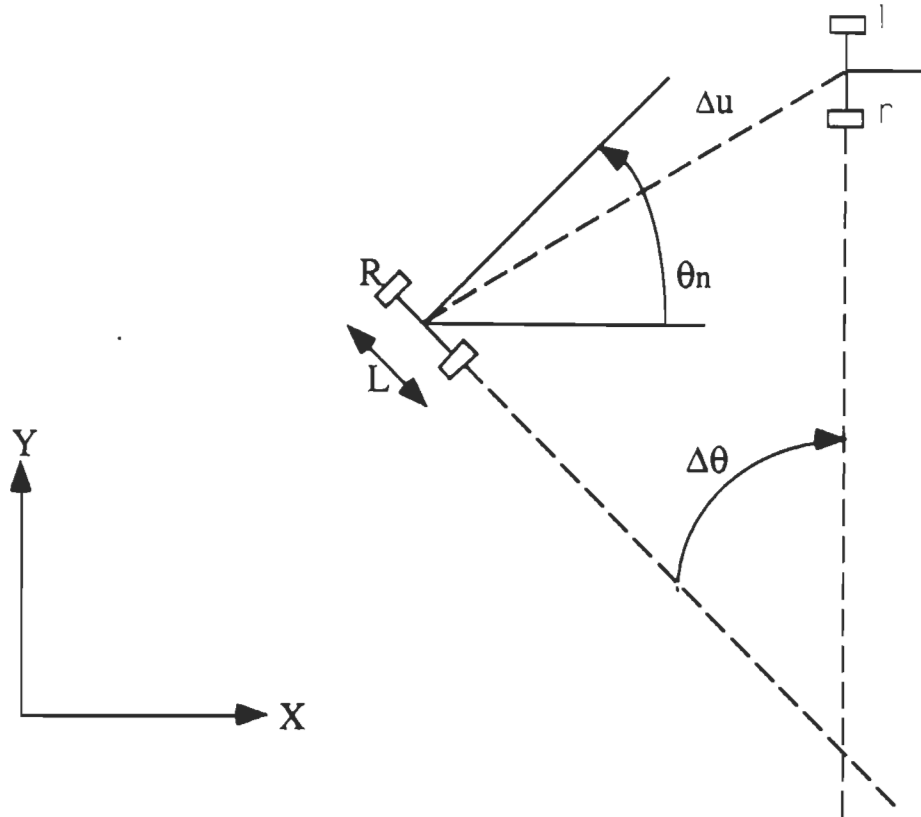
où:

-  $\theta_n$ ,  $X_n$  et  $Y_n$  sont, à l'instant  $t_n$ , l'attitude du véhicule et les coordonnées du point milieu de l'axe des deux roues.

-  $\Delta\theta_n$  et  $\Delta U_n$  sont les variations, entre les instants  $t_n$  et  $t_{n-1}$ , de l'attitude et de la distance parcourues respectivement par les roues gauche et droite et  $L$  la distance séparant ces deux roues. Ce qui permet de fournir une estimation de la position et de l'attitude du véhicule par rapport à un référentiel orthonormé lié à l'environnement.

Toutefois, il convient de remarquer que le principe de l'odométrie est généralement appliqué à partir des informations des encodeurs optiques montés sur les roues du robots. Les mesures sont donc biaisées par les incertitudes sur le rayon des roues, et faussées par les glissements qui ne sont pas compensées.

Cette technique devient d'ailleurs inutilisable en terrain accidenté. L'odométrie est de toute façon un système de localisation à "court terme" du fait que l'erreur croît avec le déplacement.



$$\Delta\theta_n = \frac{(\Delta u_l - \Delta u_r)}{L}$$

$$\Delta u_n = \frac{(\Delta u_l + \Delta u_r)}{2}$$

$$\theta_n = \theta_{n-1} + \Delta\theta_n$$

$$\Delta X_n = X_{n-1} + \Delta u_n \cdot \cos\left(\frac{\theta_n + \theta_{n-1}}{2}\right)$$

$$\Delta Y_n = Y_{n-1} + \Delta u_n \cdot \sin\left(\frac{\theta_n + \theta_{n-1}}{2}\right)$$

Figure I.2- Principe de l'odométrie

## **b) Autres méthodes**

D'autres méthodes recourent à l'intégration et sont envisageables. Elles s'appuient sur les mesures de vitesse (gyromètre, vélocimètre ...) ou d'accélération (accéléromètre) et semblent promises à un bel avenir. Mais, comme dans le cas de l'odométrie, l'attitude qui sera obtenue nécessite d'être corrigée régulièrement pour éviter une trop grande accumulation d'erreurs. Ceci est obtenu par un recours au recalage qui est une localisation absolue simplifiée par la connaissance approchée de l'attitude.

En fin, il faut nommer deux types de capteurs qui fournissent directement une information sur l'attitude du véhicule. Il s'agit des gyroscopes qui peuvent notamment indiquer l'inclinaison par rapport à la verticale du lieu (angles de tangage et roulis); et des compas magnétométriques qui repèrent angulairement le robot en référence à la direction du champ magnétique du lieu (sur deux ou trois axes).

Cette orientation relative peut devenir absolue si le champ magnétique mesuré s'avère être le champ terrestre. Cependant, bien que les capteurs actuels soient suffisamment sensibles, ce dernier type de localisation souffre des nombreuses sources de perturbation qui peuvent altérer les mesures, à commencer par le véhicule lui-même ou les éléments d'un environnement intérieur.

Ayant pour souci de ne pas particulariser l'environnement, nous avons retenu une solution de dernier type, en considérant toutefois qu'elle n'est pas suffisante pour permettre au véhicule d'estimer sa position aussi

souvent qu'un bon guidage l'exige. Entre deux estimations absolues, une localisation à cadence beaucoup plus élevée est donc nécessaire; elle est obtenue à l'aide d'une méthode de localisation relative.

## **II.2.4 Sécurité-état**

On introduira en premier lieu la sécurité active pour parler par la suite de la connaissance de l'état du robot.

### **II.2.4.1 La sécurité active**

C'est un système susceptible d'engendrer une information de perception et qui intervient pour palier les lacunes et faiblesses de l'analyse de l'environnement ou de la localisation. Celles-ci sont principalement dues aux limites physiques des capteurs embarqués pour ces fonctions. Cela va du problème de temps de réponse pour une acquisition de mesure à l'inaptitude comme la limite de sensibilité (caméra) ou l'absorption par le milieu (télémétrie à ultrasons). Elles proviennent aussi des délais imposés par le traitement pour extraire l'information pertinente.

Il en résulte qu'un certain nombre de fonctions supplémentaires sont souhaitables (mais pas forcément nécessaires) pour combler certaines lacunes de perception susceptibles de nuire au bon déroulement des actions du robot. Ces fonctions reposent en général sur des capteurs simples et pouvait donner directement l'information utile.

**a) La détection de chocs avec un obstacle**

Elle est réalisée par un pare-choc, moustaches de chat, ou des arceaux de sécurité donnant une indication sur le point de contact.

**b) La détection de la présence d'une entrave au mouvement** telle qu'un obstacle très proche, trou ...

Elle est réalisée par une barrière ultrasonique ou optique (diodes infrarouges, nappe de laser ...).

**II.2.4.2 Connaissance de l'état physique**

Il convient de se préoccuper de la connaissance de l'état physique du robot et plus exactement de son aptitude au fonctionnement.

En effet, si l'on veut maintenir des conditions normales de fonctionnement, il est judicieux de pouvoir détecter les situations anormales et/ou diagnostiquer les parties défailantes du système. Cela va de la surveillance de l'autonomie énergétique au contrôle du fonctionnement des organes du robot comme les processeurs embarqués, les capteurs, les moteurs et les mécanismes divers .... Toutefois, dans les projets de recherche ces aspects ont été rarement développés. Ils reposent, en effet, sur la notion de système opérationnel et fiable qui concerne bel et bien le domaine industriel là où on ne parle que de produits finis. Alors qu'au domaine de recherche le système élaboré doit être ouvert aux évolutions.

Néanmoins, les travaux concernant le diagnostic de système et la problématique du contrôle d'exécution redonnent un intérêt à la constitution d'une connaissance de l'état physique puisqu'ils apportent les outils d'exploitation de telles informations, et que par ailleurs, la notion d'autonomie recouvre aussi la notion de fiabilité et tout ou moins celle de robustesse.

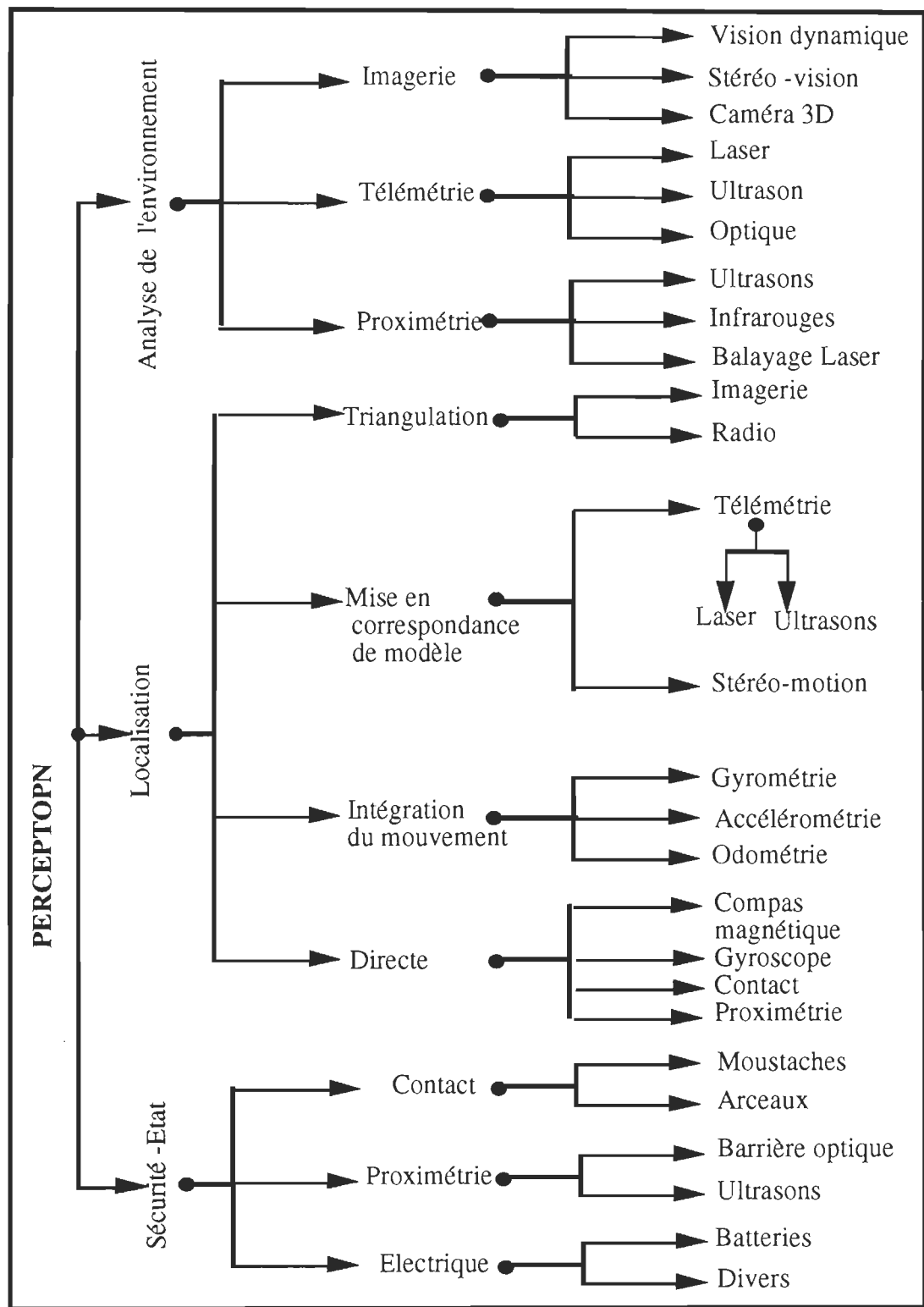


Figure I.3- Moyens de perception



## **II. 3 Aspects décisionnels**

Cet aspect est intervenu tout d'abord dans la navigation. En effet, dès que les robots disposèrent de moyens de locomotion et de capacités de perception suffisantes, il devient intéressant de développer les techniques leur permettant de déterminer eux mêmes leur trajectoire dans l'environnement. Ce fut le premier pas franchi vers leur autonomie.

Un autre pas a été entamé avec l'étude des planificateurs d'actions et des structures de contrôle destinées à manipuler les fonctions du robot en réponse aux tâches à accomplir et des évolutions de l'environnement. De sorte que l'aspect décisionnel apparaît dans deux parties:

- la modélisation de l'environnement et la navigation,
- la gestion des capacités du robot.

### **II.3.1 Modélisation de l'environnement et navigation**

La modélisation de l'environnement est un ensemble d'étapes de traitement des données de perception fournies par les capteurs. Elle génère plusieurs modèles à différents niveaux d'abstraction.

#### **II.3.1.1 La modélisation géométrique**

Le but est de disposer d'une carte des lieux où sont intégrées les caractéristiques géométriques perçues des éléments de l'environnement. Celles-ci sont bien souvent des points ou des segments ou contours extraits d'images ou de segmentation de nuages de points de mesure comme dans le

cas d'exploration par télémétrie. L'intégration des perceptions doit tenir compte des diverses causes d'incertitude pour assurer la parfaite cohérence de l'ensemble des informations obtenues. Du modèle obtenu, dit modèle géométrique, se dégage la notion d'espace libre ou occupé qui sera exploitée pour le déplacement du robot. Mais, il est également utile pour la localisation par mise en correspondance de modèle.

Pour générer un déplacement sans collision avec les objets de l'environnement qui ont été perçus, il faut interpréter ce modèle géométrique.

Un maillage cartésien de l'espace perçu dans lequel on identifie les zones libres, inconnues ou occupées par les obstacles est utilisé dans plusieurs projets (voir chapitre II). Il conduit à une discrétisation de l'environnement.

Sur d'autres projets, l'espace libre est décomposé en cellules polygonales convexes ou rubans, s'appuyant sur les sommets des obstacles perçus.

### **II.3.1.2. Modélisation topologique**

La structuration du modèle géométrique se traduit par un graphe qui affranchit des contraintes géométriques en mettant en valeur des liaisons relationnelles particulières. C'est ce qu'on le retrouve dans la table de visibilité des sommets d'obstacles, ou dans le graphe d'adjacence des cellules polygonales convexes. Ceci constitue la modélisation topologique de l'environnement.

### **II.3.1.3 Recherche de chemin**

Le modèle topologique ainsi obtenu peut alors être soumis à une recherche de chemin. L'algorithme extrait du graphe un chemin joignant le robot au but en minimisant une fonction de coût attachée aux branches du graphe. Le chemin est exprimé en termes de points intermédiaires à rallier qui conduisent au but. Il faut encore le transposer géométriquement.

Cette fonction associée à la modélisation topologique forme ce qu'on appellera la recherche de chemin.

### **II.3.1.4 Modélisation sémantique**

Il est possible de mettre en évidence des structures particulières dans le modèle topologique comme des noeuds d'articulation ou des composantes connexes. Il devient ainsi possible d'associer une information du type sémantique aux structures extraites et gagner en abstraction. Les concepts introduits identiques à celles qu'utilise l'homme comme les pièces, les couloirs ou les portes. Cette étape forme ce qu'on appelle la modélisation sémantique de l'espace.

### **II.3.1.5 Recherche d'itinéraire**

Les outils de recherche de chemin sont bien évidemment encore applicables sur les graphes associés au modèle sémantique. Ils trouvent les chemins qui conduisent d'une pièce à l'autre, par exemple. Nous parlerons ici de recherche d'itinéraire.

### **II.3.1.2 Génération de trajectoire**

En fin pour passer d'un chemin topologique à une trajectoire exécutable par le robot, il est fait appel à un traitement particulier qui prend en considération la cinématique du robot et la modélisation géométrique de l'environnement. C'est la fonction dite génération de trajectoire. Son rôle est de déterminer les consignes d'exécution de la trajectoire par les asservissements du système de locomotion pour réaliser le mouvement jusqu'à l'objectif visé. Si pour atteindre le but, il faut passer par plusieurs configurations intermédiaires, le mouvement généré peut être alors être lissé compte tenu des limitations de la cinématique et de l'encombrement du robot. Ce dernier aspect concerne aussi les problèmes posés par la génération de trajectoire en espace contraint récemment abordé pour les robots mobiles et qui nécessite une approche particulière.

### **II.3.1.7 Navigation**

La structuration de l'espace, la recherche de chemin, la recherche d'itinéraire, et la génération de trajectoire constituent avec la localisation ce que l'on désigne par navigation.

## **II.3.2 Gestion des capacités du robot**

Le second volet de l'aspect décisionnel est représenté par la planification et le contrôle.

Toutes les fonctions que nous avons décrites jusqu'ici réalisent un certain nombre de traitements spécifiques ou prennent en charge un

actionneur ou un capteur mais ne font pas intervenir le fait que la perception, le déplacement ou tout autre chose réalisée par le robot s'effectue pour parvenir à la réussite d'un objectif qui dépasse les capacités de chacune de ces fonctions.

Le rôle de la planification et du contrôle est de tirer part de la synergie des fonctionnalités qui constituent le robot dans le cadre des tâches qu'il est susceptible d'accomplir et dans l'environnement qu'il doit affronter.

### II.3.2.1 Générateur de plan

Pour arriver à ceci, deux étapes sont suivies. La première consiste à trouver les fonctions qui doivent intervenir et leur organisation pour atteindre le but visé. Elle est réalisée par ce que l'on appelle le générateur de plans et a pour résultat un plan d'actions ( action veut dire fonction à accomplir).

### II.3.2.2 Types de connaissances

Il faut noter ici que les connaissances manipulées sont de deux types:

**a) Type factuel:** Il est l'image de l'état dans lequel se trouve le robot et l'environnement. Ces connaissances sont bien évidemment nourries par l'aspect modélisation de l'environnement vu plus haut.

**b) Type opératoire:** Il est une image des capacités fonctionnelles du robot.

Toutefois, la première étape ne suffit pas car elle ne fournit que le mode d'emploi associé à la tâche à accomplir. Nous pouvons en comparer le

résultat à une recette de cuisine que devrait confectionner un hypothétique robot cuisinier. Il faut ensuite casser les oeufs, et mélanger la farine, comme l'indique la recette; de même, il va falloir activer les fonctions du robot et les coordonner conformément au plan.

Les capacités de décision interviennent aussi au niveau du contrôle d'exécution et plus particulièrement dans la matière des situations d'échec des fonctionnalités requises par le plan.

Or, très peu de projets de robots mobile ont inclus l'aspect lié au contrôle qu'on vient d'évoquer. Cependant, avec l'enrichissement des capacités de perception d'une part, et la maîtrise des techniques de génération de plan d'autre part, la problématique du contrôle d'exécution prend d'emblée toute son importance et s'avère être un des ciments de l'intégration des systèmes et par conséquent un des critères de l'autonomie des robots mobiles.

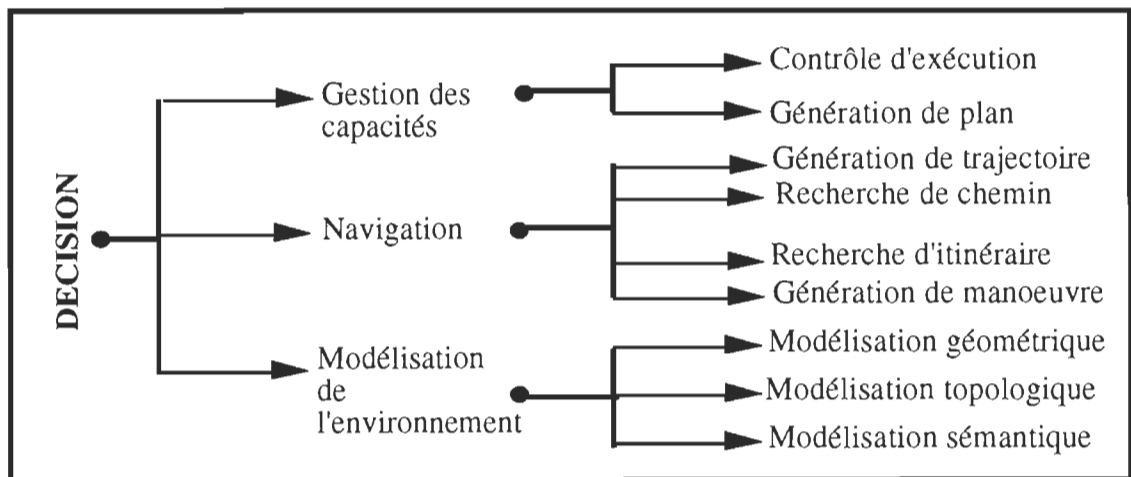


Figure I.4-Moyens de décision

## II.4 COMMUNICATION

Les premières préoccupations qui accompagnent la conception d'un système composé de multiples parties, comme c'est le cas des robots mobiles évolué, concernent les difficultés de connexion des divers éléments entre eux. Il convient par conséquent de se préoccuper de la structure qui véhicule les informations et du formalisme qui sert à accéder aux capacités du robot. Ceci est l'objet du dernier domaine: la communication, et recouvre deux volets. En effet, on distingue les échanges internes, plutôt liés à la structure physique et informatique du robot, de l'aptitude à interpréter ou répondre à des requêtes fournies par un interlocuteur extérieur, qu'il soit l'homme ou la machine.

Le premier volet concerne directement l'aspect fonctionnel du robot et reflète la puissance de la structure de gestion de ses capacités. Il est donc finalement très lié au contrôle par la maîtrise des communications. Les informations véhiculées dans ce cas sont des données et des éléments de contrôle.

Deux tendances extrêmes peuvent être dégagées. L'existence d'une entité par laquelle doivent transiter tous les messages conduit à l'approche "communication indirecte". Dans une telle situation, un demandeur peut ne pas savoir la source des informations qui lui sont fournies. A l'opposé, pour la "communication directe", l'échange peut être établi directement entre deux interlocuteurs sans recours à un intermédiaire. Ceci est typiquement utilisé pour les échanges nécessaires à un asservissement et plus généralement

lorsque le débit d'information est important. Cependant, cette structure nécessite un interfaçage plus complexe et semble plus rigide.

### **III. CONCLUSION**

Ce premier chapitre nous a donné une vision d'ensemble des robots mobiles. L'analyse que nous venons d'effectuer fait apparaître en premier lieu que les méthodes et techniques capables de répondre aux fonctionnalités qui semblent nécessaires à un robot mobile sont nombreuses et variées. Et qu'en second lieu, une structuration doit être établie pour servir au mieux les objectifs d'autonomie.

A ce niveau, même si intrinsèquement, les fonctions de base sont identiques (locomotion, localisation), les structures qui sont élaborées sont parfois très différents d'un robot à l'autre. Ceci va de la conception fermée où les aspects de perception, décision et d'action sont étroitement liés, à la modularité la plus totale, plus propice à l'aspect évolutif du robot.

Tout au long de l'analyse fonctionnelle que nous avons menée pour pénétrer l'architecture des robots mobiles, nous avons pu sentir au niveau des capteurs comme à celui des actionneurs qu'un traitement spécifique devait y être attaché dans le cadre d'une fonction à remplir. Nous pouvons donc logiquement tenter de décomposer le système complexe "robot mobile autonome" en sous systèmes plus élémentaires, qu'implicitement l'analyse fonctionnelle nous a déjà fait évoquer.



On dit par module fonctionnel, une entité qui reçoit des informations, les transforme, en extrait d'autres qu'elle donne et qui obéit aux règles suivantes:

1. *un capteur ou un actionneur dépend d'un module propre,*
2. *un module dispose d'algorithmes et de modèles spécifiques,*
3. *si un module a pour unique donneur un module dont il est l'unique receveur, ils ne font qu'un.*

Cette définition n'indique rien sur la nature des échanges qui s'établissent entre les différents modules constitutifs d'un robot. On proposera dans un premier temps de considérer les modules comme une boîte noire (au sens automatique du terme) ayant une entrée, par laquelle est spécifiée la tâche à laquelle il est dédié et une sortie où sont fournis les actions.

Les signaux d'entrée et de sortie sont multiples, c'est -à-dire qu'un seul et même module peut faire différentes choses ( séquentiellement le plus souvent) dans la mesure où ces actions se rapportent à un même capteur ou proviennent d'une synthèse dûe à la règle 3.

En général, un module fonctionnel apporte un ensemble de commandes ou d'opérateurs de traitement communs à un capteur, un actionneur ou une classe de traitement, que l'on nomme primitives de base.

L'ensemble des modules fonctionnels est aisément représenté par un diagramme fonctionnel dans lequel on met en valeur les échanges de module à module par des flèches et où chaque module est représenté par un rectangle.

Les flèches traduisent ici tout l'aspect de communication interne. On peut déjà distinguer les échanges pour le contrôle de ceux pour les données. Le diagramme est un indicateur de l'aboutissement de l'intégration de l'ensemble.

La structure modulaire est intéressante à plusieurs titres. Tout d'abord, par la décomposition en éléments plus réduits, il devient plus aisé de parvenir à la constitution, à la réalisation et à la validation des techniques et de systèmes qu'on isole.

Deuxièmement, l'adjonction de modules se fait sans heurts car ils ne remettent pas en cause la structure générale. Conceptuellement, il n'y a que quelques flèches à ajouter pour rattacher les nouveaux modules à l'ensemble.

Or, si on met en place la structure modulaire telle que nous l'avons définie, très vite nous nous heurtons à une difficulté dont la taille croît avec la complexité des situations rencontrées dans l'environnement.

Elle s'exprime dans l'exemple suivant. Imaginons qu'un objectif à atteindre soit un mouvement en boucle fermée sur une source de localisation.

Le schéma typique immédiatement associé montre l'enchaînement des modules concernés et le flot de données qui y est attaché. Ainsi dans notre exemple on a:

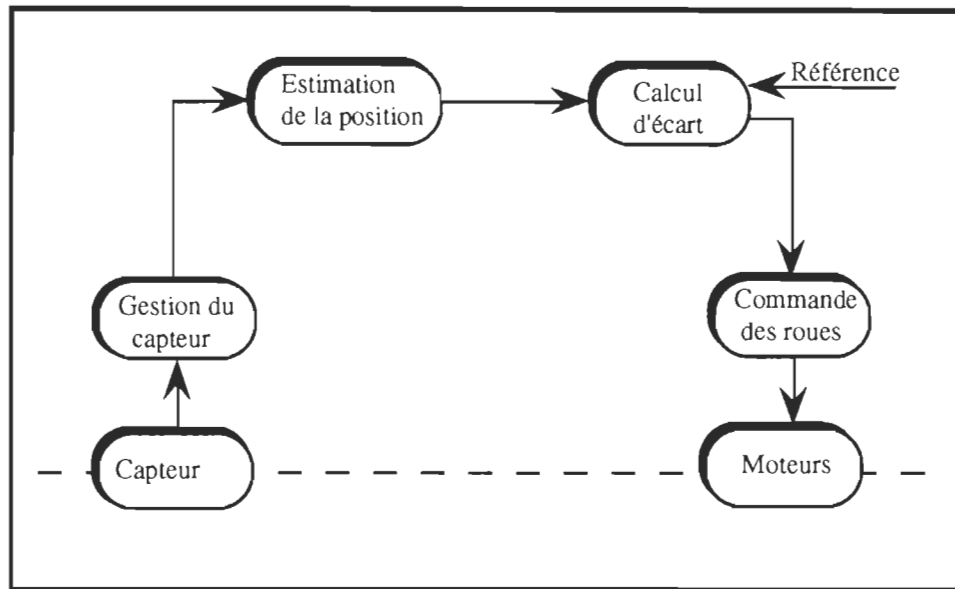


Figure I.5 - Exemple de diagramme fonctionnel

Tout se passe bien jusqu'à ce qu'un module pas du tout concerné veuille signaler qu'il a perçu, par les capteurs qu'il gère, un danger immédiat (une fosse devant le robot, par exemple).

Qui va entendre cette information capitale pour la suivie du robot ?

Personne. Pour la simple raison qu'aucun des modules ne peut se permettre d'écouter tous les autres en plus de son travail. Et quand bien même, l'alarme serait perçue, qui peut prendre la décision d'une action sans risquer d'établir un conflit avec d'autres informateurs ?

Avec la structure de module, toute la richesse des fonctionnalités se perd si l'on n'est pas capable de maîtriser les interconnexions. En voulant extraire des sous-systèmes on se heurte inévitablement à des problèmes d'interface et de transfert d'informations. L'ensemble des modules fonctionnels peut être comparé à un ensemble de musiciens, leur instrument

tenant lieu de capteurs ou d'actionneurs, la partition tenant lieu de plan, et qui peuvent faire de merveilleux solistes mais qui ne sont pas capables de constituer un orchestre, tout au plus existe-t-il quelques petits groupes qui s'entendent bien. Vous l'avez devinez l'élément manquant est le chef d'orchestre, dont le rôle est justement d'être à l'écoute de tous pour mieux les solliciter. Une autre structuration qui prend en compte la nécessaire subordination entre des modules fonctionnels devra donc être introduite. Cette structuration peut être verticale ou hiérarchique.

La première se présente sous forme d'une découpe par niveaux de compétences basée sur l'enrichissement progressif du comportement. Alors que la deuxième approche est basée sur l'orientation privilégiée des échanges mais qui tient compte aussi du degré d'abstraction des informations manipulées et des capacités décisionnelles mises en jeu.

En fait dans la plupart des projets, nous avons pu déceler jusqu'à présent quatre niveaux hiérarchiques distincts:

- 1—*acquisition des mesures, gestion de capteurs, commande des actionneurs*
- 2 —*intégration d'information et élaboration de modèles*
- 3 — *navigation*
- 4 —*planification d'action et contrôle d'exécution.*

qui regroupent toutes les capacités fonctionnelles que nous avons évoquées.

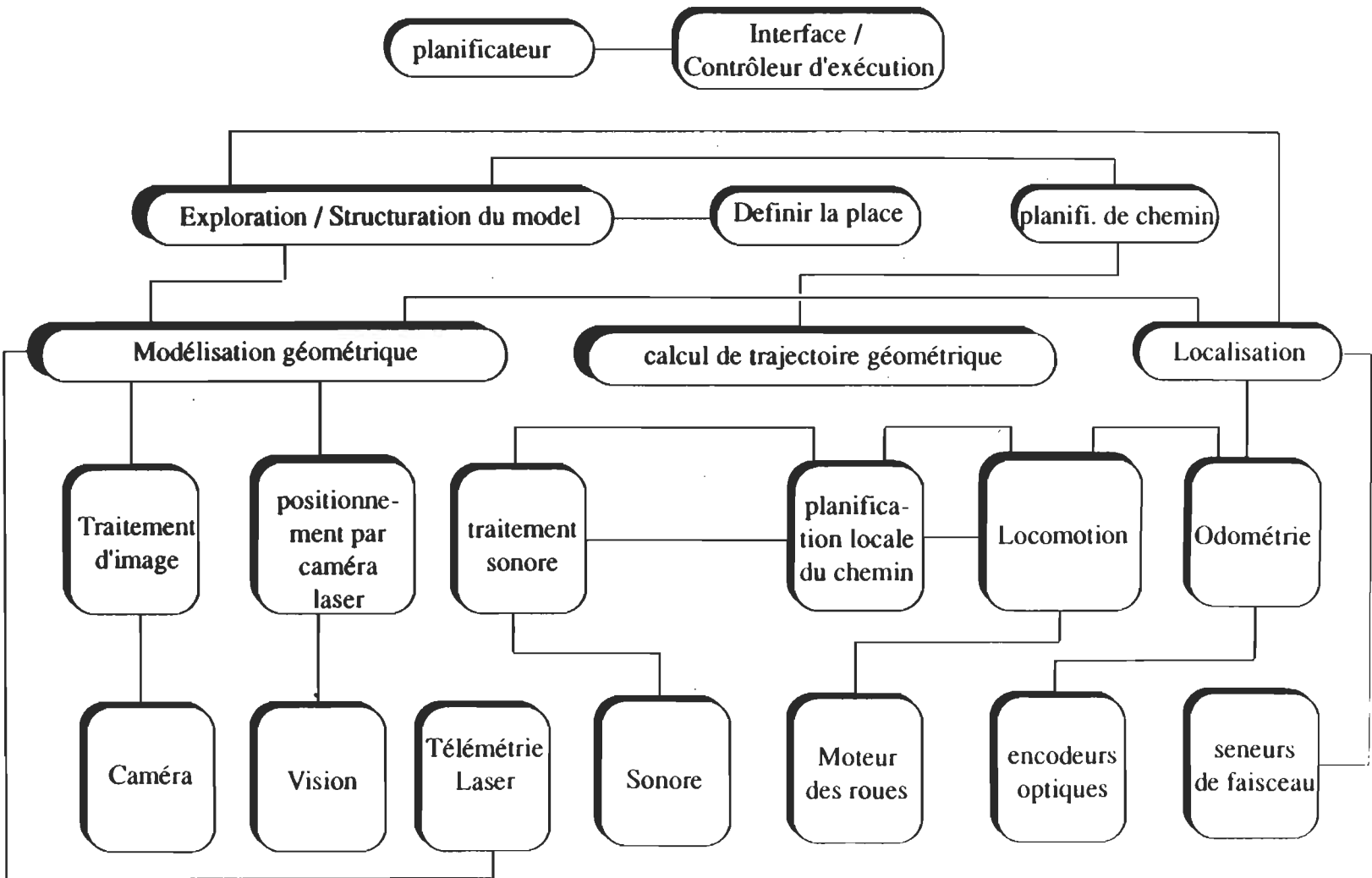


Figure I.6- Décomposition fonctionnelle du robot mobile

---

## Chapitre II

# STRUCTURES DE COMMANDE MISES EN OEUVRE SUR QUELQUES ROBOTS MOBILES

---

### I. INTRODUCTION

Nous allons exposer les principales recherches avec plus ou moins de détails, selon l'importance de nos sources, et nous adopterons l'ordre chronologique, bien que certains travaux aient eu lieu en parallèle. On ne parlera pas des systèmes de commandes où le robot était astreint à suivre un chemin fixe déterminé par des équipements externes placés dans son environnement d'évolution. On fera plutôt allusion aux travaux qui ont grandement aidé et marqué la nouvelle vague de robots mobiles dits de troisième génération.

## **II. LES PRINCIPALES CONTRIBUTIONS**

### **II.1 Le robot mobile SHAKEY**

Le premier des projets de robot mobile autonome complet, c'est à dire, possédant des capacités de perception, locomotion et décision élaborées, fut celui du SRI, surnommé SHAKEY à cause de sa démarche.

La première version de SHAKEY a été réalisée fin 1969, une deuxième et dernière fut mise au point fin 1971 et ce robot fut ensuite abandonné. SHAKEY devrait être remplacé par un successeur, le général Factotum, mais ce projet n'a pas reçu les crédits nécessaires.

En tant que précurseur, ce projet posa la plupart des problèmes conceptuels et y apporta des solutions intéressantes. Les problèmes techniques furent naturellement résolus avec les contraintes de la technologie de l'époque.

#### **II.1.1 Description du véhicule**

Le véhicule était symétrique et possédait deux roues motrices, dont l'axe passait par le centre du robot, commandées par des moteurs pas-à-pas indépendants et deux roues folles, une à l'avant et une à l'arrière. Le robot pouvait ainsi effectuer des lignes droites et des rotations autour de son axe vertical.

Le système de perception était constitué par une caméra VISICON et un télémètre optique; des "moustaches de chat" ( des tiges souples transmettant le contact à un microrécepteur) étaient utilisées comme détecteur de proximité.

La communication avec l'ordinateur de contrôle était assurée par deux liaisons radio dont une pour la transmission de l'image vidéo.

### **II.1.2        Système informatique**

Ce système était initialement constitué par un seul ordinateur XDS-940 qui assurait toutes les tâches. Ceci posait d'ailleurs d'important problèmes de "swapping" entre les segments des différents programmes et de gestion d'interruptions en temps réel. Dans la deuxième version, le 940 fut remplacé par un PDP-10.

### **II.1.3        Système décisionnel**

Le plus grand apport de ce projet fut sans doute la mise au point de son centre décisionnel, le célèbre STRIPS. Le système décisionnel fut organisé , dans la deuxième version, en quatre niveaux.

Au niveau le plus bas, se trouvaient les primitives du système qui permettaient la commande directe des effecteurs et senseurs.

Ensuite des actions de niveaux intermédiaires assuraient certaines fonctions comme la navigation. Ces actions étaient primitives du niveau supérieur STRIPS, les plans élaborés étaient exécutés par le niveau suivant, PLANEX.



Ce système décisionnel utilisait un seul modèle du monde sous forme d'un ensemble d'axiomes du calcul des prédicats du premier ordre. L'exécution des actions de bas niveau modifiait ce modèle du monde.

Des actions de niveau intermédiaire avaient toutefois leur propre représentation. C'est le cas du système de navigation qui utilisait une grille plane de 4x4 carreaux, chaque cellule pouvait être:

- (1) vide,
- (2) pleine,
- (3) partiellement pleine ou
- (4) de contenu inconnu,

Une cellule partiellement pleine est subdivisée elle même en une grille 4x4. En tout trois niveaux de grille pouvaient être utilisés jusqu'à obtenir un carré d'un pied de côté. Un programme spécial avait pour tâche la mise à jour du conteur des cellules. Le modèle de grille était utilisé pour produire un graphe dont les noeuds étaient les sommets des obstacles (polyédraux). Un arc liant deux noeuds indiquait que les deux sommets étaient atteignables l'un de l'autre en ligne droite.

En fait, les noeuds étaient les sommets des obstacles grossis de manière à tenir compte de la taille du robot afin de le représenter par un point.

Le point représentatif du robot et le but étaient ajoutés à ce graphe et le meilleur chemin entre les deux points était fourni par l'utilisation de l'algorithme A\* avec la profondeur de recherche comme critère.

## **II.2 Le robot mobile JASON**

Le second projet de robot mobile complet fut celui de l'Université de Berkely. Le souci des concepteurs fut initialement la limitation du coût.

### **II.2.1 Description du véhicule**

Le robot "physique" était un véhicule de plusieurs étages mesurant 2x2x4 pieds et pesant 300 livres, et possédant deux roues motrices commandées par des moteurs à courant continu à l'arrière et une roue folle à l'avant. Le véhicule pouvait effectuer des lignes droites et des rotations centrées sur l'une des roues motrices.

Un manipulateur de conception simple était monté à l'avant du véhicule, ainsi qu'une barre pour détecter le contact des objets et pour les pousser.

Le souci d'économie dans la conception et le fonctionnement élimina l'usage d'une caméra bien que vers la fin de l'existence de JASON une caméra CCD 100x100 fut en projet.

Les moyens de perceptions dont JASON fut effectivement doté consistaient en:

(i) une torche à ultrason à balayage ( longueur d'onde variant entre 2.5 à 5 mm) qui devait permettre la mesure de la distance et de la texture des objets,

(ii) 8 diodes électro-luminescentes en infra-rouge (LED) distribuées sur le pourtour du véhicule et sur le bras du manipulateur (détecteur de proximité).

## **II.2.2      Système Informatique**

Ce système était initialement un miniordinateur HP3000 en temps partagé. Il fut ensuite remplacé par un PDP10. L'emploi des microprocesseurs devenant de plus en plus courant, un projet d'un système multi-microprocesseur avec un Intel 8080 pour gérer chaque senseur fut étudié plus tard.

JASON pouvait être considéré comme un terminal ASCII pour le connecter à des ordinateurs différents.

## **II.2.3      Système décisionnel**

Ce système était composé de plusieurs "opérateurs" hiérarchisés et deux générateurs de plans furent mis à l'étude.

Le premier était conçu comme un réseau procédural dans lequel un graphe orienté des processus indiquait leurs conditions d'ordonnancement. Le second devait tenir compte des environnements où l'information est incertaine, et utilisait les concepts flous.

Deux modèles étaient utilisés par le système. Un modèle relationnel qui était un réseau sémantique général, et un modèle géométrique pour la navigation. Ce dernier consistait en une grille de taille et d'espacements

variables ramenée à un repère cartésien dont l'origine était placée au centre de la pièce. Cette grille est remplie à partir des données du modèle relationnel sur la position et les dimensions des obstacles. Des pointeurs permettaient d'indiquer à quel objet du modèle relationnel correspond une zone de la grille. Les obstacles sont entourés d'une zone de sécurité égale à la moitié de la taille du robot afin de réduire ce dernier à un point.

La recherche de chemin, après désignation des coordonnées du but, était effectuée en traçant la ligne droite qui joint le robot au but et en considérant l'une des extrémités des parois d'obstacle que coupe cette ligne comme sous-but, et ainsi de suite. Le choix du chemin était effectué par une méthode de recherche en première largeur modifiée. Les capacités de manoeuvre de JASON posaient un problème particulier qui obligeaient soit à augmenter la taille de la zone de sécurité, soit à vérifier à chaque rotation et fin de ligne droite la possibilité d'une collision.

### **II.3 Le robot mobile du JPL "ROVER"**

Le projet le plus ambitieux de robot mobile fut celui que le JPL a commencé à réaliser dans le but de mettre au point un système autonome d'exploration planétaire (pour la planète Mars). Ce robot devait donc évoluer dans un environnement "réaliste" (peu idéalisé) et être effectivement suffisamment performant puisque l'intervention de l'homme dans la boucle de décision ne pouvant être rapide (distances astronomiques...), ni parfois possible.

### **II.3.1 Description du véhicule**

Le robot expérimental servant de support de recherche était de la taille d'une petite voiture et comportait :

- un châssis avec 4 roues motrices, les paires avant et arrière pouvant tourner,
- divers capteurs de vitesse et d'attitude,
- 2 caméras et un télémètre laser,
- un manipulateur,
- une liaison radio.

### **II.3.2 Système Informatique**

Le système informatique devait être constitué par un réseau de microcalculateurs et un minicalcateur à bord, reliés à un gros ordinateur par radio. Le système a toutefois fonctionné initialement avec un minicalcateur GA SPC-16 et un PDP10, en plus d'un système graphique IMLAC PDS-ID.

### **II.3.3 Système décisionnel**

Le système décisionnel était conçu comme une hiérarchie de processus concurrents distribués sur les différents calculateurs. Ces processus pouvaient communiquer entre eux par un système de boîte aux lettres. La structure de contrôle principale à bord coordonnait plusieurs processus (vision, navigation, manipulation) et communiquait avec l'opérateur à travers un système de contrôle "à terre". Le système a fonctionné avec une configuration

ou le PDP 10 assurait le plus haut niveau de contrôle. Un planificateur général était à l'étude. Les langages utilisés étaient SAIL,, LISP pour le PDP10 et les processus de haut niveau, FORTRAN et assembleur pour le minicalculateur.

Le système de navigation est constitué par 3 processus concourants qui sont :

- 1) L'exécutif de la navigation ;
- 2) Le module de planification du chemin ;
- 3) Le module de contrôle du véhicule.

Le processus de modélisation de l'environnement consistait à bâtir, à partir des données de la stéréovision, une grille à 2 dimensions de 3 m d'espacement et ramenée à un référentiel absolu. Chaque secteur de cette grille contenait une description géométrique de la partie de l'environnement qu'il délimitait. A l'intérieur d'un secteur, la scène était divisée en zones traversables, non traversables et inconnues. Les zones non traversables (obstacles) ou inconnues étaient approximées par des polygones dont on définit aussi un cercle circonscrit et un centroïde.

Le processus de recherche de chemin, après détermination du but et de la position du robot, commençait par charger tous les secteurs de la grille se trouvant sur la ligne droite robot-but. Les frontières des secteurs chargés étaient alors considérées comme des obstacles particuliers et on pouvait charger d'autres secteurs contigus si le chemin calculé rencontrait de telles frontières. La recherche était menée en partant du point représentant le robot et en cherchant si le but est visible en ligne droite. Sinon, les sommets des

côtés avec lesquels il y a intersection étaient testés à leur tour. Mais pour ce faire, une table de visibilité des sommets (comprenant le but et le robot) était construite au fur et à mesure.

L'algorithme de recherche de chemin utilisé (PATH\*) était similaire à A\* et utilise la distance comme fonction de coût. Les chemins traversant des régions connues étaient préférés à ceux passant par des régions inconnues.

La taille et les capacités de manoeuvre du robot étaient prises en compte près des sommets en testant le chemin trouvé pour le centre. S'il y avait intersection entre les côtés des obstacles et la surface balayée par une translation du robot le long de ce chemin (les rotations sont aussi testées par une procédure particulière), on considérait les sommets du côté intersectant comme sous-buts, comme précédemment.

## **II.4 Argos I**

Ce système simulait les fonctions "vision", "toucher" et recherche de chemin, et était implanté sur IRIS-80. Deux types d'obstacles étaient pris en compte : visibles et invisibles mais détectés par le toucher. Le système de vision permettait de simuler la détection de la présence d'obstacles sur une grille 100x100. Le robot était assimilé à une case de la grille et pouvait se déplacer dans les quatre directions (N, S, E, O). La recherche de chemin utilisait un marquage de cases. Afin de rendre cette recherche plus rapide, une procédure spéciale rajoutait des obstacles fictifs. Le chemin était alors obtenu beaucoup plus rapidement mais un "lissage" était nécessaire car le chemin trouvé ainsi contenait beaucoup de changements de direction inutiles.

## **II.5 Yamabiko**

L'étude de ce robot mobile autonome est menée à l'Université de Tsukuba au Japon.

### **II.5.1 Description du véhicule**

De faible dimension (35x40x52 cm), ce robot pèse 15 Kg et possède deux roues motrices (moteurs à courant continu) et deux roues folles. Il possède comme moyens de perception un émetteur-récepteur à ultrasons, et une caméra est prévue.

### **II.5.2 Système Informatique**

Toutes les ressources informatiques sont à bord et sont constituées par 3 microprocesseurs 6802.

### **II.5.3 Système décisionnel**

Yamabiko ne possède pas une structure décisionnelle sophistiquée, étant données ses capacités de calcul. Ce système est composé par 3 modules gérant la perception vidéo, la locomotion et la prise de décision pour la navigation. Cette navigation est basée sur une modélisation de l'univers par l'extraction d'un "squelette" constitué par un ensemble de points représentatifs des objets (un point par objet). Le squelette est décrit par deux listes, l'une décrivant les objets identifiés par les points et l'autre décrivant les relations entre les points représentatifs (distance, angle). Certaines conditions restrictives doivent toutefois être satisfaites si aucune information



n'est donnée à priori. Cette structure est ensuite utilisée pour la recherche du chemin.

## **II.6 CART**

C'est un robot mobile autonome qui a été développé à l'Université de Stanford et dont les premiers pas (ou plutôt les premiers tours de roues) datent de la fin des années 1960. Son histoire est résumée dans la thèse de H. MORAVEC, où les difficultés de tous ordres rencontrées par le projet, et par le chercheur, sont exposées avec beaucoup d'humour.

### **II.6.1 Description du véhicule et du système informatique**

Le robot mobile est une plate-forme de 1x1 m, à 4 roues manoeuvrant comme une voiture et pesant 100 Kg. Il possède un seul senseur qui est une caméra (60° d'ouverture) et est relié par une liaison radio à un ordinateur DEC KL-10, en temps partagé.

### **II.6.2 Système décisionnel**

Le système décisionnel de CART concerne uniquement le traitement des données de la vision et la navigation. L'originalité de ce projet réside dans la vision stéréo effectuée de deux manières :

- 1) Par corrélation de neuf images prises en effectuant une translation de la caméra de 50 cm, le robot étant à l'arrêt ;
- 2) Par corrélation entre les images prises à deux positions du robot distantes de 75 cm.

(Malgré son intérêt, notamment par la simplicité des moyens utilisés, le traitement d'image dure de 10 à 15 minutes, après chaque avancée de 75cm). La position réelle du robot, relativement aux obstacles, est déduite de la stéréovision.

La navigation modélise les objets de l'environnement du robot en sphères, ramenées à des cercles sur le sol. CART lui-même est représenté par un cercle de 3 m puis est ramené à un point, les cercles représentant les obstacles étant grossis par son rayon.

L'évitement des obstacles consiste à trouver le plus court chemin, entre le robot et le but désigné, tangent aux cercles représentant les objets. Ceci est réalisé en appliquant une variante de l'algorithme de DIJKSTRA sur le graphe dont les sommets représentent les obstacles, plus le robot et le but, et dont les arcs sont les tangentes communes aux obstacles. Toutefois, étant donné que deux cercles ont généralement 4 tangentes communes, chaque obstacle est représenté par 2 points dans ce graphe et sera contourné dans un sens ou dans l'autre selon le point choisi.












Nom du robot	Forme et dimensions en mètre	Hauteur en mètre	Poids en Kg	Type de traction
Shakey	 1.07 1.07	1.74		Deux roues motrices en arrière et une roue folle en avant
Rover	 2.40 2.40		227	Quatres roues motrices et directrices
Jason	 0.6 0.6	1.22	136	Une roue folle en avant et deux roues motices couplées
A.R.F.A		-	-	Deux roures motrices et deux roures folles
TAIP	 1.10 1.60	0.60		Deux roues motrices et une roue motrice directrice
Yamabico 1 2 3 3.1	 0.39x0.59 0.24x0.27 0.35x0.40 0.35x0.35	1.03 0.20 0.52 0.53		Deux roues folles et deux roues motrices
Newt	 R = 0.34	0.76		
Hilare	 1.10 1.10	0.70		Une roue folle et deux roues motrices
Cart	 1 1	1	100	Deux roues directrices couplées et deux roues motrices
Mel-Deic	 0.48x0.65		54	Deux roues folles et deux roues motrices
Mel-Doc 1 2 3	 0.49x1.12 0.35x0.84	1 0.47		Une roue directrice, deux roues motrices

Figure II- Tableau récapitulatif des principaux travaux de recherches (a)

Nom du robot	Moteurs de traction et de direction	Organes sécurité	Manipulateur	Perception	Système informatique
Shakey	Deux moteurs pas-à-pas indépendant	Moustaches de caht pare-choc pneumatique	bras retroc-table	Télémétrie laser Caméra rotative	calculateur extérieur à radio
Rover	Quatre moteurs CC à double brequage	Capteurs tactiles	manipulateur	Télém. laser Gyroscope Odométrie 2 caméras	Calculateur embarqué +extérieur +cable
Jason	Deux moteurs CC éventuellement couplés	Capteurs à US et à IR	bras	torche ultrasonore	calculateur extérieur à radio
A.R.F.A	Deux moteurs CC	Capteurs tactiles		Télém. acoustique fixe + mobile	Calculateur
TAIP		Capteur optique + micro-switches		Télém. optique triang. radio	
Yamabico 1 2 3 3.1	Deux moteurs CC			radar rotatif à US odométrie	micro-processeur embarqué
Newt	Deux moteurs pas-à-pas	capteur infra-rouge	bras	torche à US repér. acoust. Caméra	mp embarqué Calcu. extér. +cable
Hilare	Deux moteurs pas-à-pas	Capteur à ultrasonore		Télém. laser triang. optique Caméra PhD	mp embarqué Calcu. extér. +radio
Cart				caméra mobile	calculateur extérieur + cable
Mel-Deic	Deux moteurs CC			odométrie ultrasonore caméra rotative périocope	mp embarqué Calcu. extér. +radio
Mel-Doc 1 2 3	Deux moteurs CC			ultrasonore marques odométrie	micro-processeur embarqué

Figure II- Tableau récapitulatif des principaux travaux de recherches (b)

---

## Chapitre III

# DESCRIPTION DU VÉHICULE

---

### I. INTRODUCTION

Nous exposons dans ce chapitre la structure de notre robot mobile, ce qui nous permettra de préciser le contexte de notre travail.

Ce projet est né en 1989. Le but de ce projet était (et est toujours) de réaliser un robot mobile autonome susceptible de se déplacer dans un environnement partiellement connu.

Nous considérons que les progrès technologiques et notamment la large diffusion des micro-processeurs permettent de réaliser actuellement un robot-système capable de satisfaire les contraintes de la robotique qui sont le traitement en temps réel et la limitation du coût.

### II. DESCRIPTION DU VEHICULE

La réalisation du robot mobile physique a été entièrement effectuée par la section de Génie Mécanique du département d'Ingénierie de l'Université du Québec à Trois-Rivières.

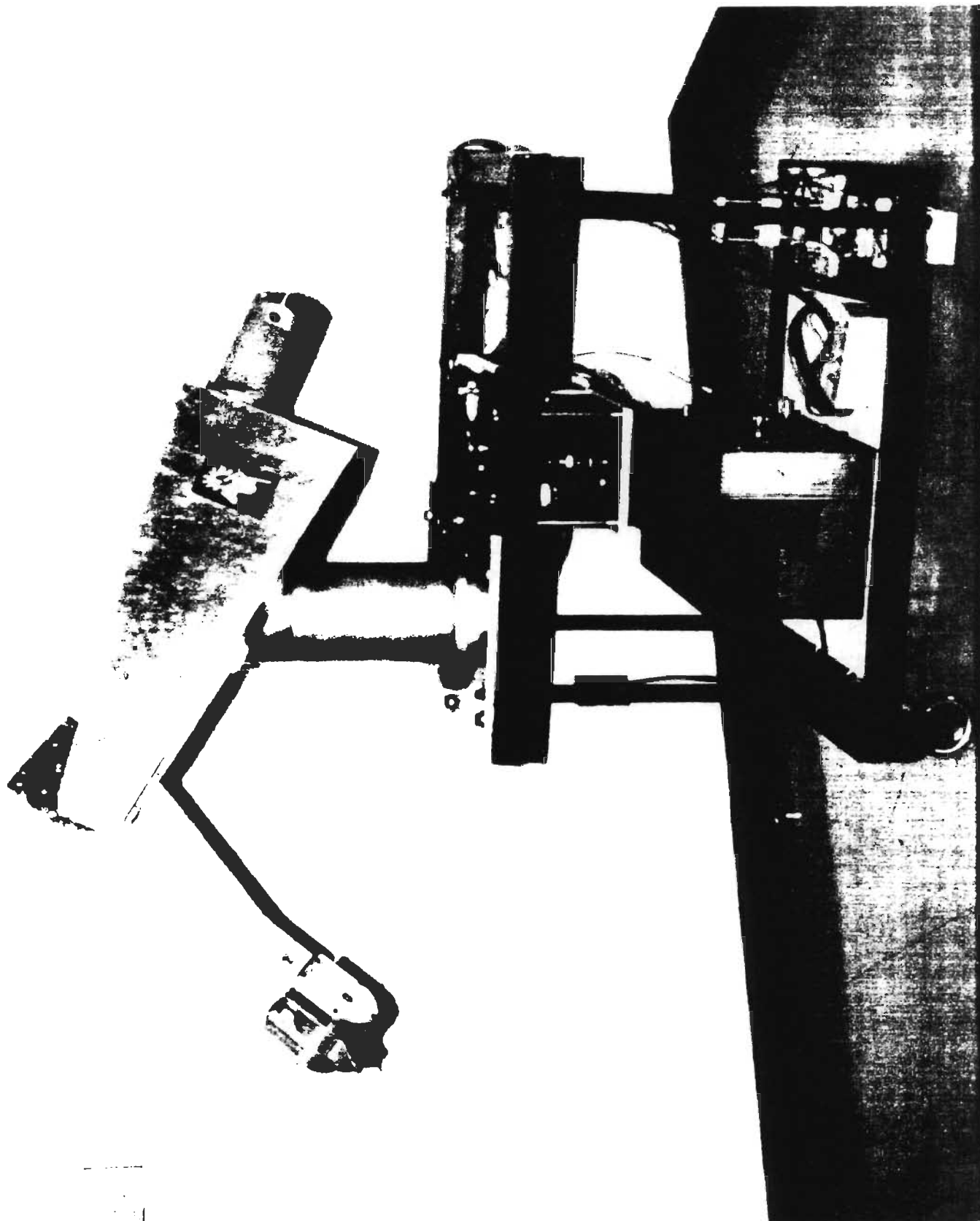


Figure III.1- Structure du robot mobile

Notre véhicule ( figureIII.1) se présente comme une structure à 3 étages dont la trace au sol est de forme rectangulaire (figure III.2).

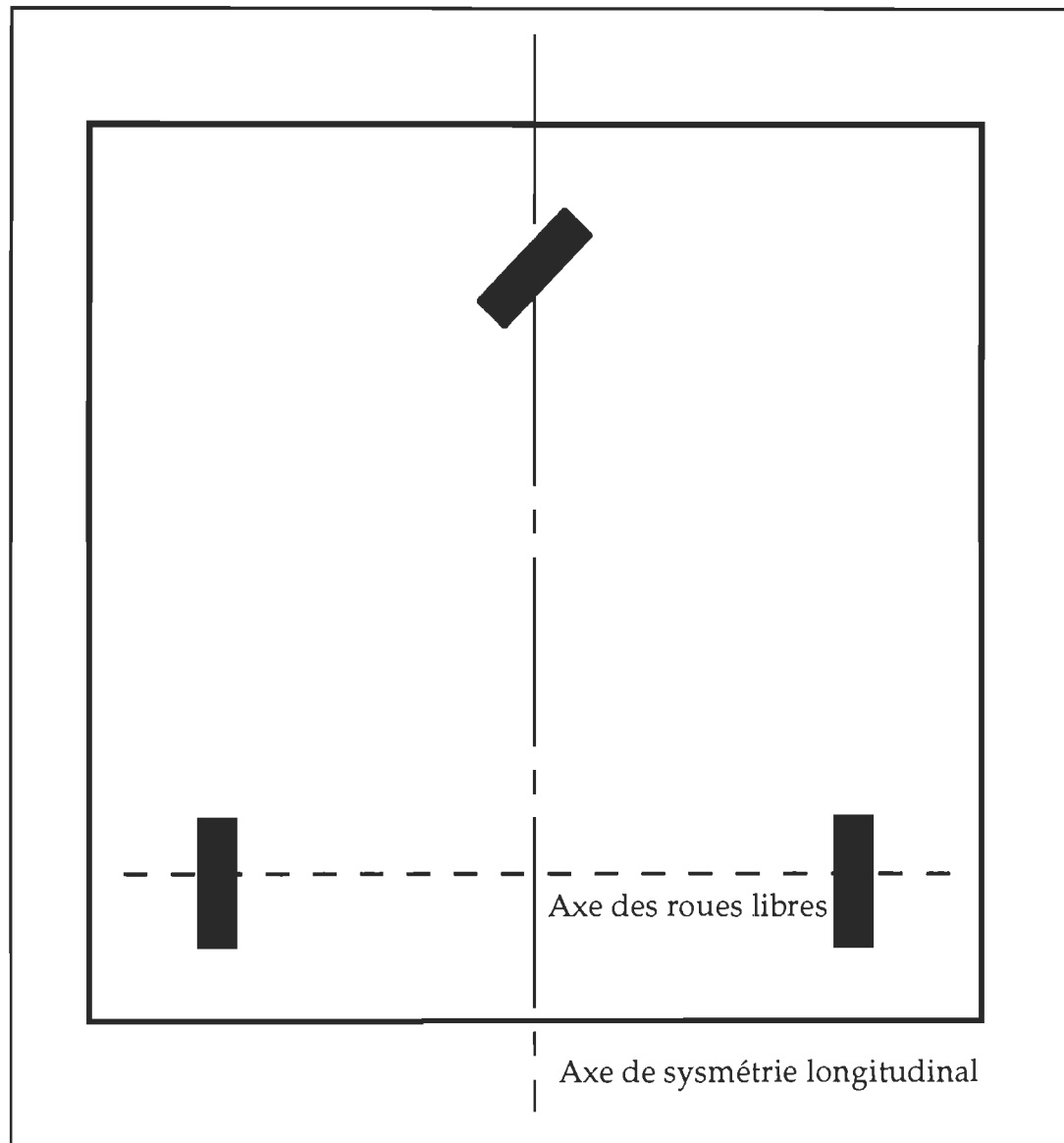


Figure III.2- Trace du véhicule au sol

Un manipulateur spécifique à six degrés de liberté est monté sur le chariot. Chaque degré de liberté est actionné par un moteur à courant continu. Dans le but de protéger les circuits électriques et électroniques du bruit des moteurs, on a utilisé des alimentations séparées pour alimenter les cartes de contrôle de celles utilisées pour les moteurs.

## **II.1 Le système de locomotion**

Il consiste en une roue motrice directrice commandées par deux roues folles. La trace des roues forme au sol un triangle.

Le choix d'une base triangulaire permet d'éliminer les problèmes de suspension et de stabilité. Cette structure permet au véhicule d'accomplir des trajectoires en forme d'arcs de cercle, et de ligne droite.

Comme le montre la figure III.3, la locomotion et la direction dans notre configuration sont reliées. En effet, c'est la même roue qui assure ces deux fonctions.

Le système expérimental pour la mesure de la position et de l'attitude du robot est formé par deux roues folles de 20 cm de diamètre placées à l'avant du véhicule. Un codeur optique générant 360 impulsions par rotation, est attaché à chaque roue. Ainsi, une impulsion sera générée chaque 0.8 mm de mouvement du véhicule. Le compteur d'impulsion compte les impulsions générées dans une unité de temps  $\Delta t$  et transfère, périodiquement, les données au calculateur associé.



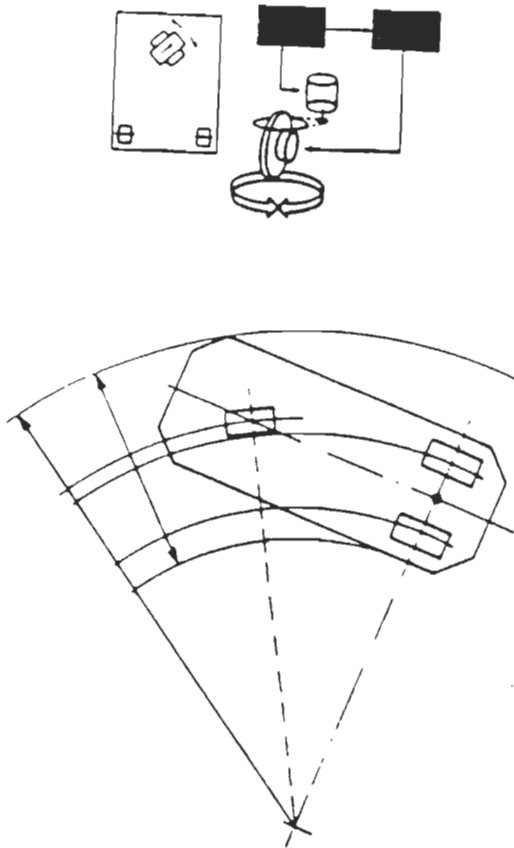


Figure III.3- Système de traction et de direction

## II.2 Le système de perception

Le projet prévoit la réalisation d'un système de perception multisensoriels comprenant:

- un télémètre laser,
- un système d'émetteur-récepteur Ultrasons
- un système d'émetteur-récepteurs infra-rouge

•••• une caméra

(a) Le laser permet de balayer le champ de vision du robot. En fait il est utiliser selon diverses stratégies ( balayage d'une zone, mesure de certains points de chaque zone ...) de façon à fournir finalement la position des obstacles et du robots dans le repère de l'environnement.

(b) le système d'émetteur-récepteurs Ultrasons comporte un seul module et un moteur pas à pas pour assurer le balayage. Il assure les fonctions suivantes:

i) Une fonction de sécurité en détectant tout objet se trouvant en-deçà d'une distance donnée du robot. On peut ainsi fixer la distance de sécurité en fonction de la vitesse et de connaître la distance et la direction de l'objet qui a provoqué l'alarme.

ii) Une fonction de navigation automatique (contournement de l'obstacle détecté). L'existence de cette fonction permet au robot d'être encore plus autonome et plus intelligent ainsi que de décharger les autres niveaux de calculs et de traitements lourds.

(c) Les émetteurs récepteurs Infra-rouges permettent de corriger périodiquement la position et l'orientation du robot moyennant l'utilisation de plaques réfléchissantes.

Dans la première étape de notre robot on a opté pour un télémètre à ultrasons du type "RADAR" ( voir figure III.4) et à l'odométrie.

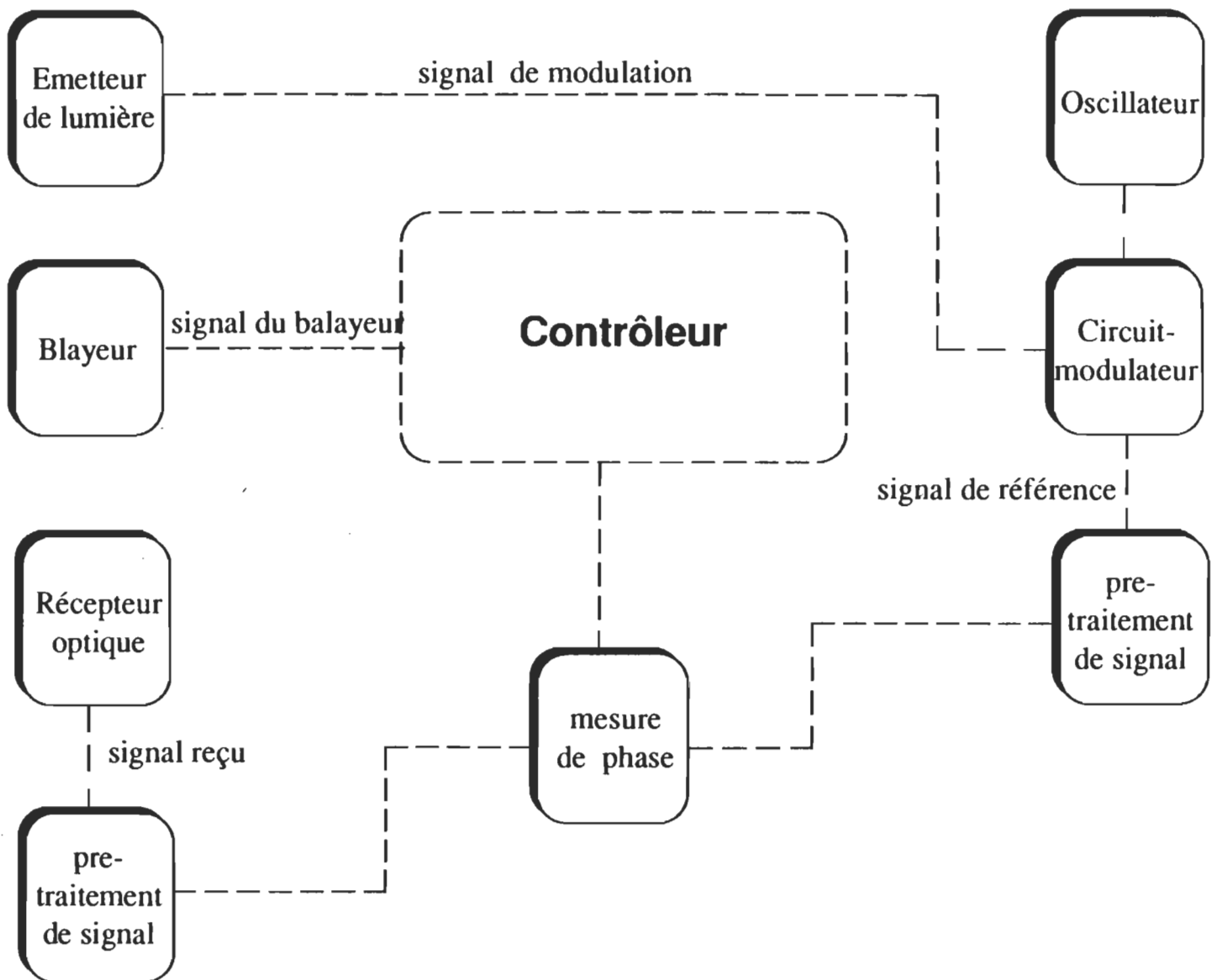


Figure III.4 Principe du télémètre à Ultrasons

En vue de doter le robot d'un champ de vision panoramique, le SONAR est mis en rotation par un moteur pas à pas.

Un mouvement de rotation permet au capteur d'effectuer un balayage de l'espace situé en avant du robot, en prélevant des mesures dans onze directions différentes.

Le moteur utilisé comporte 200 pas par tour, on effectue une mesure tous les 7 pas, ce qui correspond à un angle de  $12.6^\circ$ .

Cet écart angulaire a été choisi pour assurer un balayage homogène avec un léger recouvrement compte tenu de la directivité du faisceau (angle d'ouverture environ  $15^\circ$ ).

Ainsi, le champ de vision total du robot couvre un angle à peu près égal à  $140^\circ$  comme le montre la figure III.5:

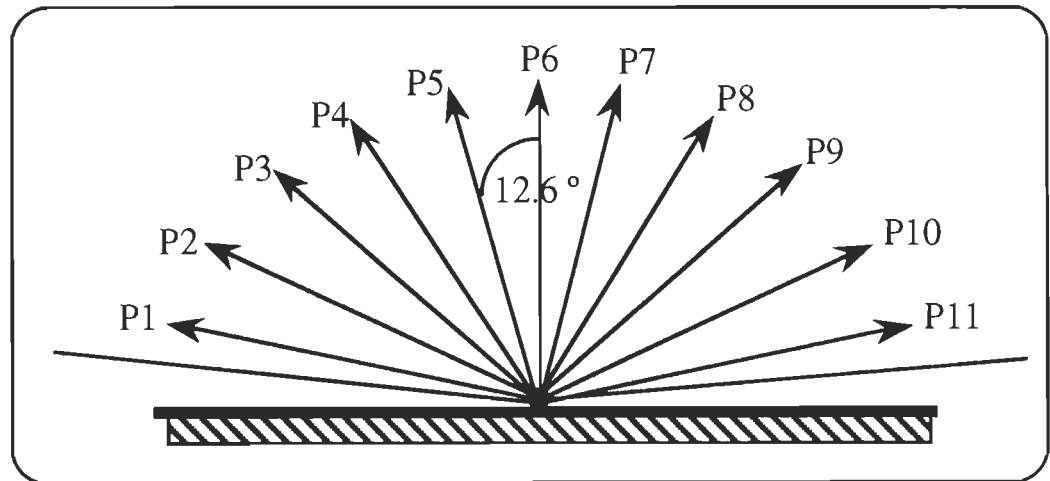


Figure. III-5. Angle de vision du SONORE

A partir d'une position extrême P1 ou P11, tous les 7 pas le moteur est arrêté et une mesure est réalisée. Le rang de la distance transmise détermine en fait les positions angulaires des mesures effectuées.

### II.3 La structure informatique

Une structure informatique appropriée est l'un des aspects qui contribuent le plus à donner à un robot mobile sa capacité d'action dans le monde physique.

La nécessité d'action et de réaction en temps réel et avec un temps de réponse faible amène à rejeter une structure constituée par un processeur unique et à concevoir plutôt une architecture composée par un réseau de processeurs ( structure multiprocesseurs). Pour des raisons de souplesse d'utilisation et de rapidité de calcul et d'exécution, La structure actuelle se présente sous l'aspect d'une architecture Maître / Esclave. Ainsi chaque moteur sera, par exemple, piloté par une carte de contrôle (esclave) implantée dans un IBM PC (maître).

Chaque carte a pour but :

- de dialoguer avec le PC (type d'asservissement désiré, paramètres du robot, paramètres de la trajectoire,...)
- de dialoguer avec les capteurs, et les actionneurs
- de faire le traitement et les calculs nécessaires pour accomplir la tâche associée.

Cette répartition de tâche entre la carte et le PC permet de faciliter la réalisation des tâches ainsi que d'alléger les calculs et les contraintes de temps de traitement des informations. Ainsi cette structure se présente comme le montre la figure III.6. Qui montre:

(i) réseau de calculateurs esclaves développés autour du microprocesseur 80188 d'Intel.

Dans cette conception, ces contrôleurs sont spécialisés dans la gestion et la commande des senseurs et effecteurs du robot. Ainsi, il y aura un contrôleur pour la commande des moteurs d'entraînement et de direction, un contrôleur pour la commande du moteur pas-à-pas pour les émetteurs-récepteurs, un autre pour la gestion du système télémétrique, pour la communication.

(ii) un ordinateur maître ( IBM PC 80 386) conçu pour recevoir les instructions aussi bien de l'opérateur via le clavier, que des autres contrôleurs esclaves.

### **II.3.1 Environnement des cartes de contrôle**

Afin de gérer les calculs, il est nécessaire que la carte de contrôle ait des informations du système sensoriel, des actionneurs de la carte de puissance et du maître PC.

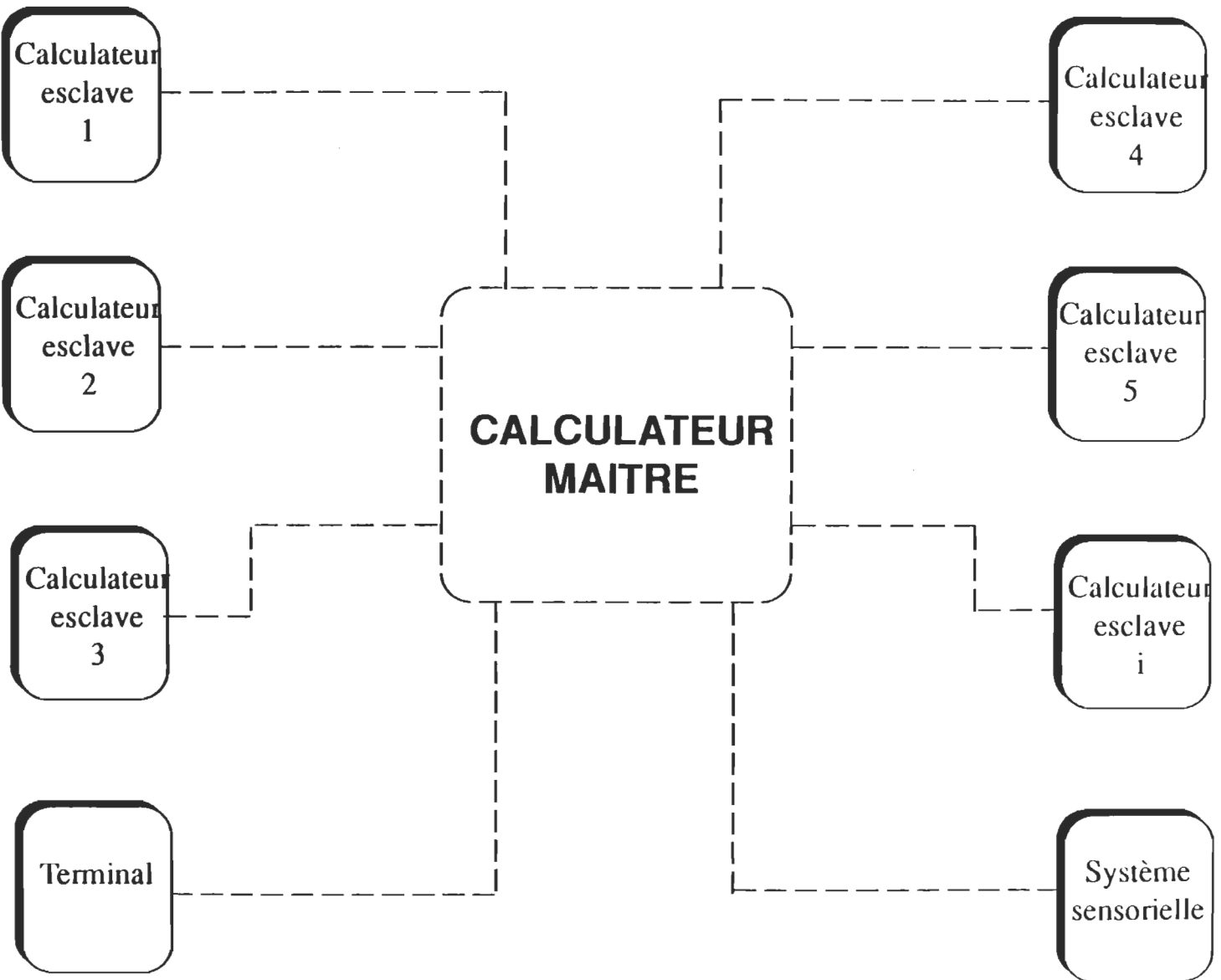


Figure III.6 Structure informatique

Ces échanges d'informations peut être schématisés de la façon illustrée par la figure III.7:

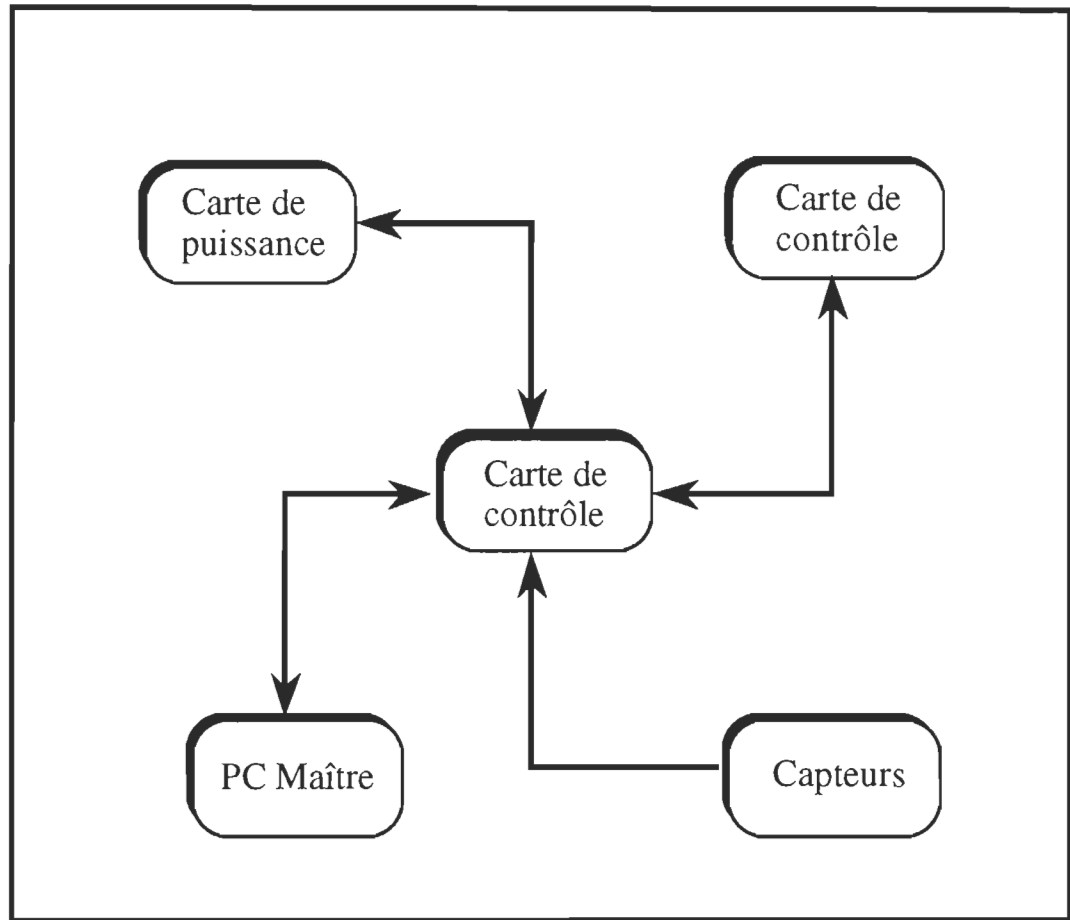


Figure III.7 Dialogue de la carte de contrôle avec son environnement

On voit bien d'après ce schéma, que la carte de contrôle est l'interface entre les différentes constituantes du système. Il faut donc qu'elle possède des outils permettant de communiquer avec le PC, les capteurs, la carte de puissance, les actionneurs, et les autres cartes de contrôle.



## II.3.2 La conception des contrôleurs

Afin d'avoir rapidité d'exécution, possibilités de calcul et liaisons pour interfaçage, la carte de contrôle est construite autour du microprocesseur iAPX 188 (ou 80 188) d'Intel.

### II.3.2.1 Le microprocesseur

Le 80 188 est un microprocesseur ayant une horloge interne de 8 MHz, avec une architecture interne de 16 bits, et un bus de données de 8 bits. De plus il possède:

- une capacité d'adressage direct de 1MByte en espace mémoire et de 64 KByte en entrées/sorties, ce qui permet la conception de programmes importants,
- des possibilités de calculs numériques sur des entrées de 16 bits, ce qui est suffisant pour les calculs d'algorithme,
- 3 horloges 16 bits programmables, utilisées pour le comptage des impulsions de l'encodeur optique, du traitement de la perception et de localisation,
- 7 Chip-selects périphériques programmables, qui serviront à la gestion des entrées/sorties des autres périphériques,
- 1 générateur d'état d'attente pour un meilleur interfaçage avec les autres composants de la carte.

La structure interne de ce microprocesseur est exposée dans la figure III.8:

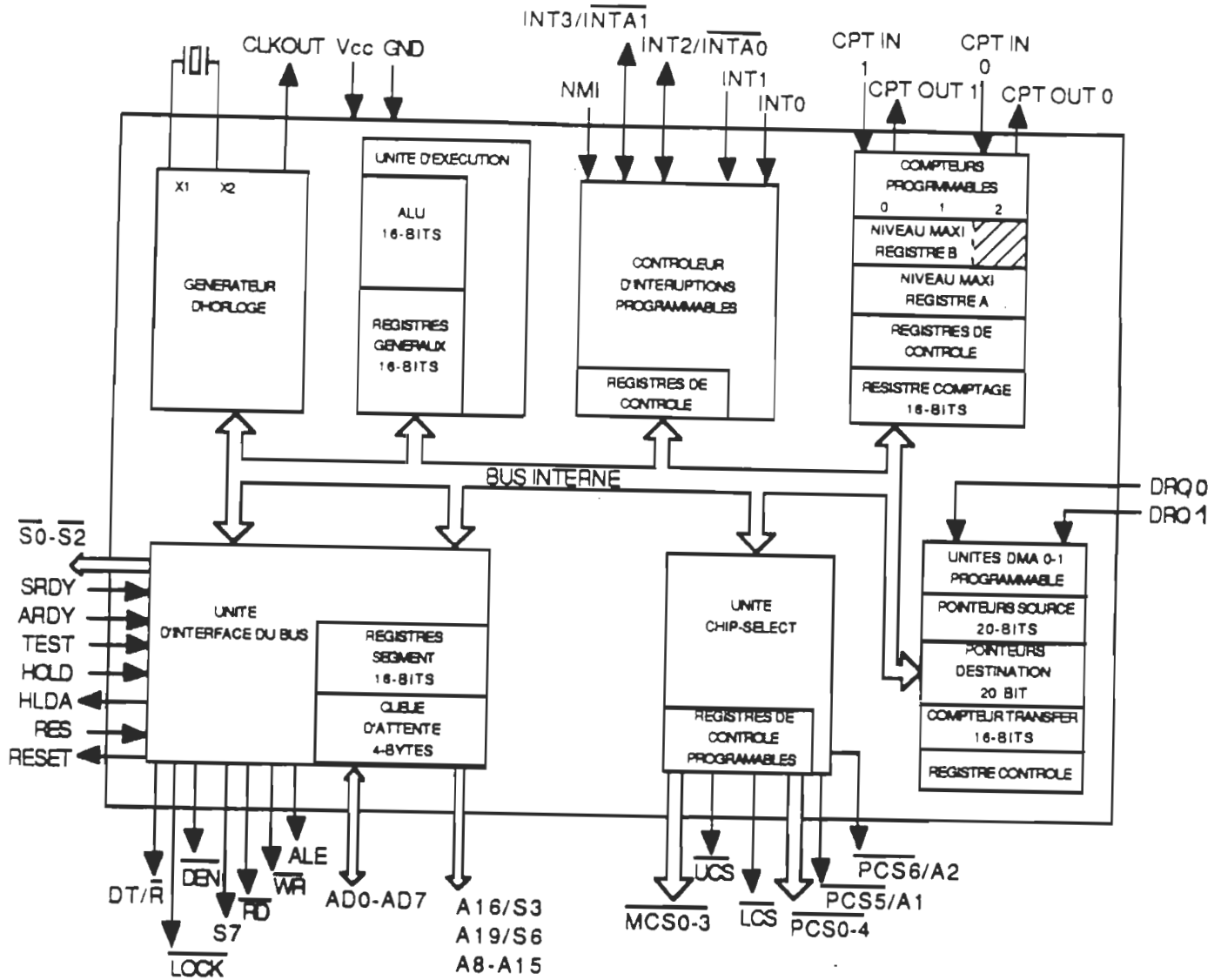


Figure III.8- Structure interne du iAPX 188

On voit donc que le 80 188 possède différents registres qui ont des fonctions bien définies. Ainsi, on peut les classer en deux catégories:

- les registres d'initialisation du microprocesseur
- les registres de travail

Pour plus de renseignement on réfère le lecteur à la référence [10]. Nous nous arrêtons ici uniquement sur le fait que grâce aux registres d'initialisation, il est possible de gérer l'espace mémoire de 1MByte disponible avec le 80 188. Ainsi, différentes régions sont mises à la disposition des composants de la carte, selon le schéma de la figure III.9:

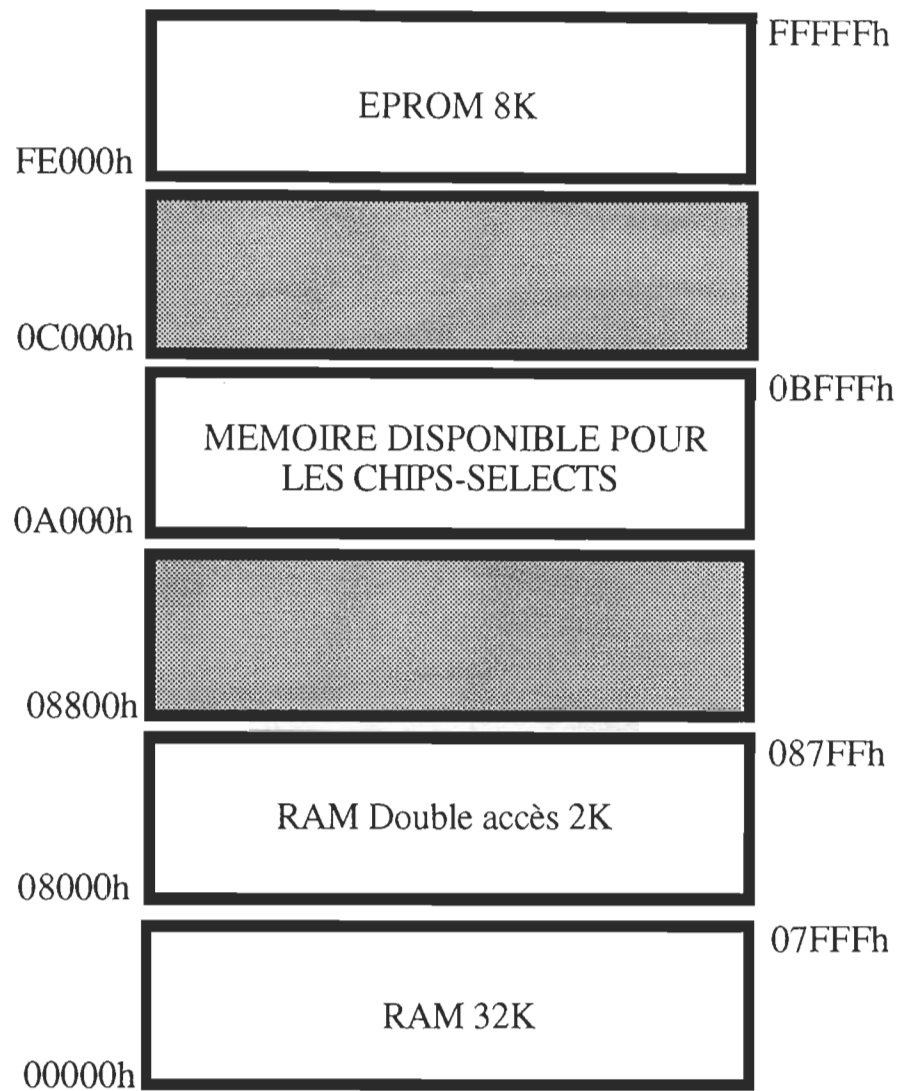


Figure III.9 Répartition de l'espace mémoire

### II.3.2.2 Les périphériques

Autour du 80 188, comme le montre la figure III.9, sont implantés les composants suivants :

- une EPROM de 8 K (2764A d'Intel) qui contient le programme que le micro-processeur doit exécuter,

- une RAM de 32K (60256 d'Intel) permettant la gestion des piles de données,
- une RAM double accès statique (CY7C12 d'Intel) permettant le dialogue avec le PC,
- un port parallèle programmable (82C55A d'Intel) permettant des échanges de données avec l'encodeur optique, la carte de puissance et les télémètres,
- un circuit de latching des adresses construit autour de deux 74L5374 d'Intel,

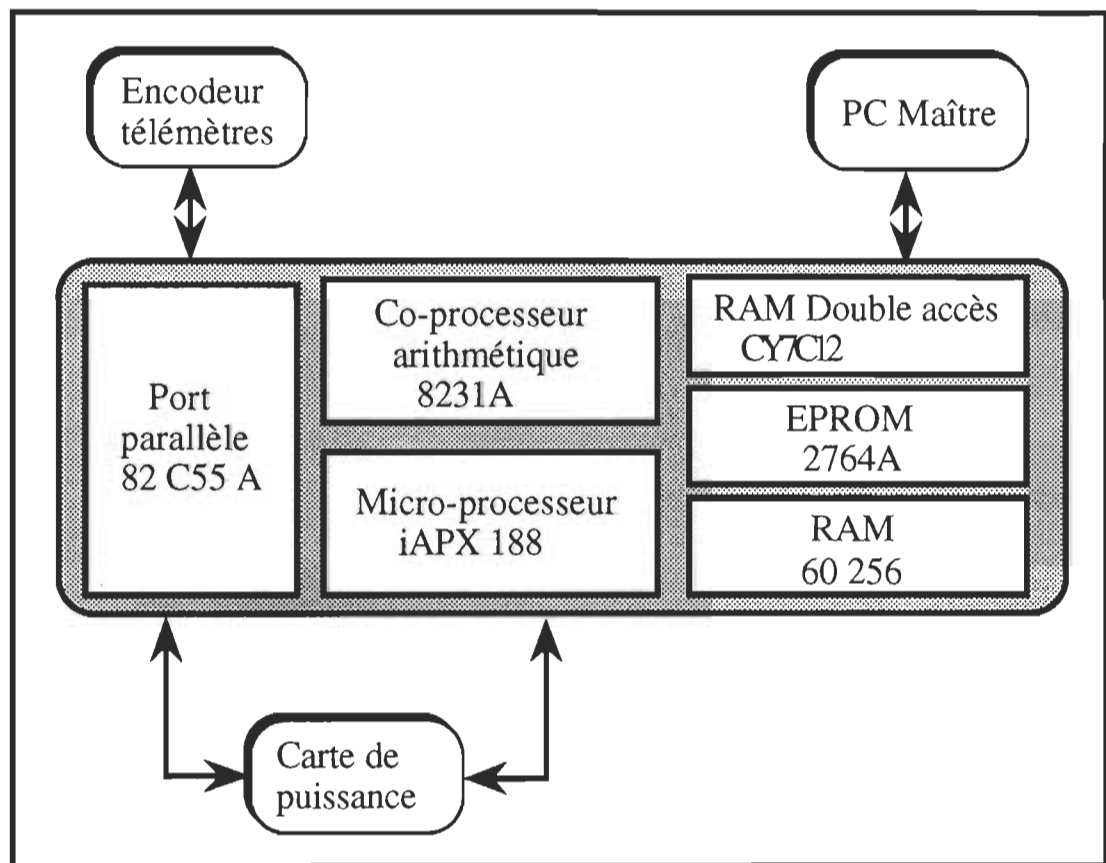


Figure III.10 Composants de la carte de contrôle

- un co-processeur arithmétique (8231A d'Intel) qui servira à augmenter la vitesse des calculs.

Tous ses composants sont disposés sur une carte rack standard de PC et assemblés par wrapping. Cette carte est insérée dans le bus du PC, afin:

- de récupérer le signal horloge du PC pour ne pas avoir de problèmes d'interaction entre le PC et le 80 188 au niveau de l'entrée dans la RAM double accès,
- de pouvoir échanger des informations entre le PC et la carte par l'intermédiaire de cette même RAM double accès.

### **II.3.2.3 Implantation de la carte**

Pour implanter la carte, il faut un ordinateur susceptible d'assurer des alimentations stables lors du démarrage. Or, tous les compatibles PC n'ont pas cette qualité. Ainsi, le LASER a une chute de tension dû au démarrage du disque dur à la mise en route. De ce fait, l'état des composants de la carte n'est plus défini, et l'exécution par le 80 188 du programme implanté dans l'EPROM n'est plus possible. Il faut donc bien choisir l'ordinateur dans lequel la carte y sera implantée.

---

## Chapitre IV

# MODÉLISATION & SCHÉMA DE CONTRÔLE

---

### I. MODÉLISATION

#### I.1 Modélisation du véhicule

**P**our notre robot mobile, on a utilisé une modélisation du type cinématique essentiellement à cause de la moindre complexité de leur expression mathématique. Elle autorise la mise en oeuvre d'une commande en temps réel.

Ce modèle décrit comment la position du véhicule  $x(k)$  change avec le temps en réponse à une entrée de commande  $u(k)$  et un bruit de perturbation  $v(k)$ .

Sa forme générale est la suivante:

$$\mathbf{x}(k+1) = f(\mathbf{x}(k), \mathbf{u}(k)) + \mathbf{v}(k) \quad (1)$$

$$\mathbf{v}(k) \sim \mathbf{N}(0, \mathbf{Q}(k)) \quad (2)$$

où  $f(\mathbf{x}(k), \mathbf{u}(k))$  est la fonction (non-linéaire) de transition

On utilise la notation  $\mathbf{v}(k) \sim \mathbf{N}(0, \mathbf{Q}(k))$  pour indiquer que la source de bruit est supposée être gaussienne à moyenne nulle avec une covariance  $\mathbf{Q}(k)$  [55].

Pour notre robot mobile, on a utilisé une modélisation du type cinématique essentiellement à cause de la moindre complexité de leur expression mathématique [1]. Elle autorise la mise en oeuvre d'une commande en temps réel.

Les coordonnées par lesquelles le véhicule est contrôlé, sont l'angle  $\alpha$  de direction de la roue arrière et sa vitesse angulaire  $\omega$  d'entraînement.

En mesurant la localisation du robot à partir de son centre de rotation, comme le montre la figure IV.1, la vitesse  $v$ , l'orientation  $\theta$ , et la position  $(x, y)$  du véhicule sont reliées aux variables de commande par les équations suivantes :

$$v = R \omega \cos(\alpha) \quad (3)$$

$$\dot{y} = v \sin(\theta) \quad (4)$$

$$\dot{x} = v \cos(\theta) \quad (5)$$



$$\dot{\theta} = \frac{R}{L} \omega \sin(\alpha) \quad (6)$$

où  $R$  est le rayon de la roue motrice et  $L$  est la distance séparant les deux roues libres.

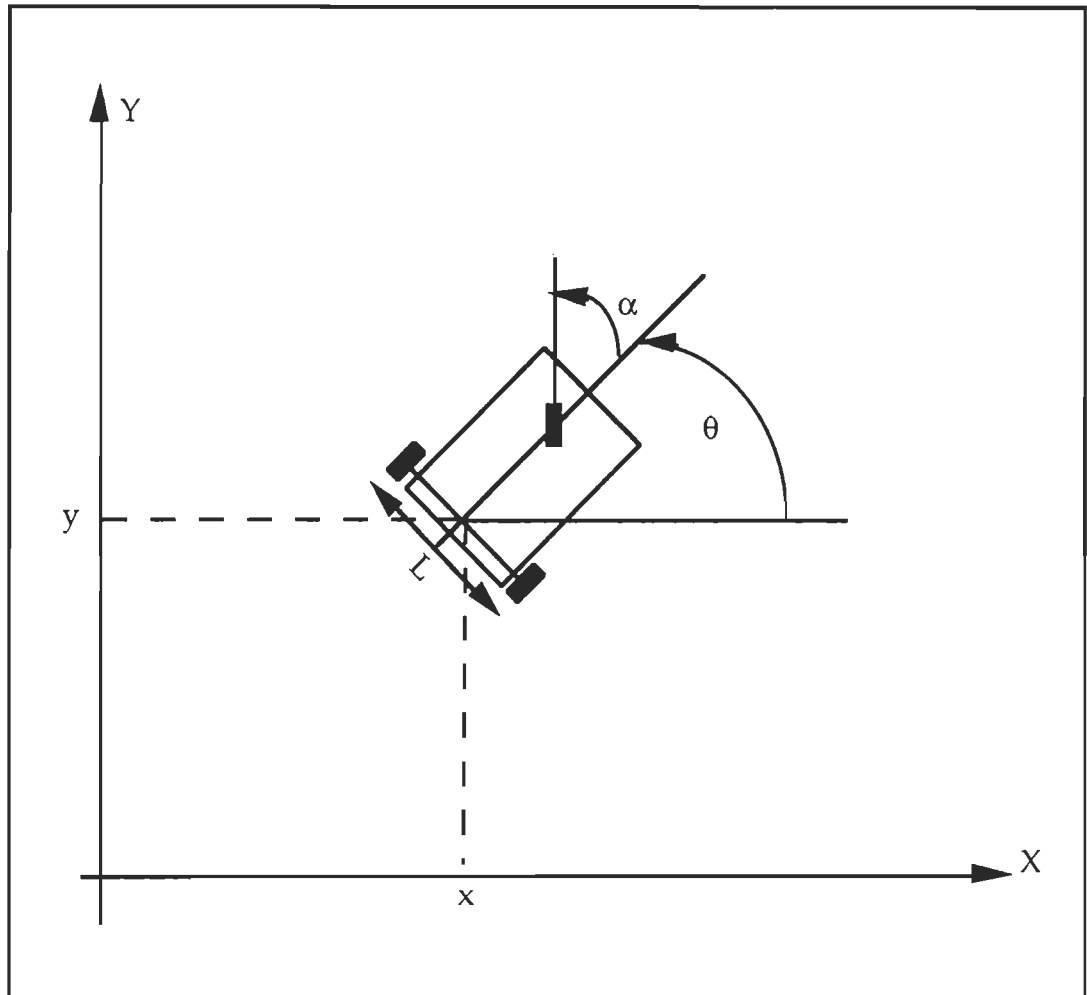


Figure IV.1- Coordonnées du robot mobile

La fonction de transition d'état du robot mobile se présentent sous une forme non-linéaire comme ce qui suit:

$$f(x(k), u(k)) = \begin{pmatrix} R\omega(k)\cos(\alpha(k))\cos(\theta(k)) \\ R\omega(k)\cos(\alpha(k))\sin(\theta(k)) \\ \frac{R}{L}\omega(k)\sin(\alpha(k)) \end{pmatrix} \quad (7)$$

## I.2 Modélisation de la mesure

Le RM est équipé par des senseurs permettant de fournir les informations nécessaires pour sa localisation dans son environnement. La position et l'orientation des senseurs télémétriques dans le repère de coordonnées lié au véhicule est donné le vecteur de la position du senseur  $\mathbf{b}_s(k) = (x'_s, y'_s, \alpha'_s(k))$ . On suppose pour le reste du travail que la connaissance du vecteur  $\mathbf{b}_s(k)$  est parfaite. Les données sensorielles issues de  $s$ , à l'instant  $k$ , prend la forme d'un balayage  $\mathbf{S}_s(k) = \{r_i(k) \mid 1 \leq i \leq m_s(k)\}$ .

Si  $(r, \alpha)$  sont la distance et l'angle polaire fournis par le repère de coordonnées lié au télémètre, la position du véhicule dans le repère de coordonnées cartésiennes est donnée par:

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} = \mathbf{C}\mathbf{R}' \begin{bmatrix} r\cos \alpha \\ r\sin \alpha \\ 1 \end{bmatrix} \quad (8)$$

Où  $\mathbf{R}$  est la transformation homogène décrivant la position relative du télémètre par rapport au véhicule et  $\mathbf{C}$  décrit la position du véhicule par rapport au système de coordonnées de base.

## II SCHÉMA DE COMMANDE

### II.1 Généralités

Les théories développées dans le domaine de la robotique industrielle se veulent applicables à l'ensemble des systèmes mécaniques capables d'agir sur leurs environnements et on peut citer entre autres:

- les robots manufacturiers (utilisés en fabrication, manutention, assemblage, contrôle, ...)
- les robots de surveillance ou d'intervention (en milieu hostile), qu'ils soient fixes (télém manipulateurs), ou mobiles (engin de téléopération monté sur un porteur mobile par exemple).

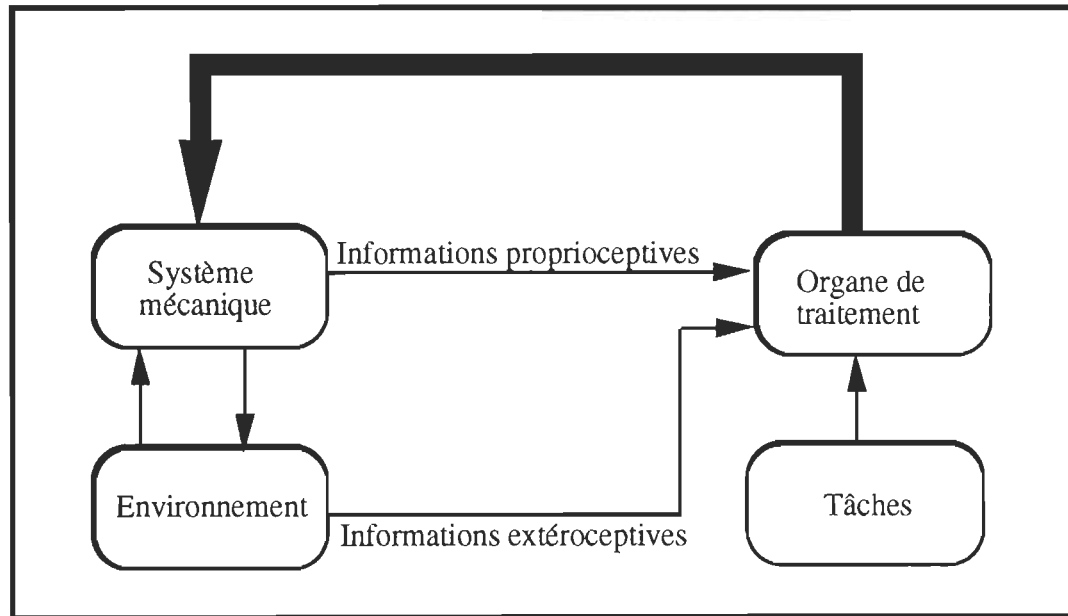


Figure IV.2- Constitution générale d'un système robotique

Un robot en fonctionnement, quelque soit sa nature, fait intervenir quatre ensembles interactifs comme le montre la figure IV.2.

- une machine mécanique équipée d'actionneurs
- l'environnement dans lequel le robot évolue
- les tâches à réaliser
- et enfin un organe de traitement d'information

Initialement, l'organe de commande, constitué d'un calculateur, possède un modèle de la machine et de l'environnement ainsi que des algorithmes de stratégie. En fonctionnement, le calculateur est informé sur l'évolution de l'état interne du robot ( par des informations dites proprioceptives) ainsi que sur l'état de l'environnement (informations extéroceptives). L'exploitation de ces informations permet d'élaborer des ordres faisant progresser le robot vers l'exécution correcte de la tâche à réaliser.

Dans le contrôle des robots mobiles, certains algorithmes de contrôle du véhicule ont été proposés. Ils sont divisés principalement en deux types: la méthode des chemins continue (CC) et la méthode du point-par-point (PP).

La première méthode est utilisée pour contrôler le véhicule pour se déplacer dans des lignes continues. La deuxième est adoptée pour contrôler le véhicule afin de suivre un point destination temporaire. C'est le cas du véhicule développé par TSUMURA et *al.* [4].

Du fait que la méthode CC nécessite plus de calcul, il n'y a pas d'utilités pour générer les séries de points cibles temporaires. De ce point de vue, la méthode CC est préférable puisque son mouvement produit est plus lisse et qu'il est plus facile de changer le chemin à parcourir durant son exécution en temps réel.

Cependant, peu de véhicules qui ont adoptés cette méthode, et ses performances ne sont guère connues de façon très claire.

Par exemple, il n'a jamais été question de s'interroger sur l'influence de la vitesse du véhicule sur les performances du contrôle. En plus, il s'est avéré nécessaire d'établir de nouveaux algorithmes qui rendent possible le contrôle des véhicules pour suivre des arcs de cercle.

Généralement, la plupart des véhicules sont dirigés en fonction de la position, de l'orientation actuelles ainsi que de la trajectoire projetée mais indépendamment de la vitesse du véhicule.

L'un des problèmes majeurs du déplacement est que les variations de la vitesse rendent le mouvement instable. C'est parce que la fonction de direction du véhicule est dépendante de la vitesse. Afin d'obtenir un système de contrôle stable, il est nécessaire de comprendre la réponse du véhicule en fonction des variables de commande.

Dans notre système-robot, on a opté pour une structure de contrôle basée sur la méthode CC.

## **II.2 Le système de contrôle global**

Le système de contrôle global du véhicule est montré à la figure IV.3. Il utilise deux types de planification: le planificateur de chemin global (PCG) qui utilise le modèle de l'environnement figé dans sa mémoire pour produire un chemin de parcours d'un endroit à un autre sans collision avec les obstacles du milieu et le planificateur local (PCL) prend ce chemin fourni par le PCG et l'applique au générateur d'états de référence (GER) qui sert à convertir les données spatiales en grandeurs temporelles détaillées. Comme le montre la figure IV.3 cet état de référence est l'entrée au contrôleur du véhicule, qui la compare avec l'état "mesurée" du véhicule pour former les signaux de commande nécessaires à appliquer aux unités d'entraînement et de direction du véhicule.

### **II. 2.1 Le planificateur de chemin global**

Dans ce type de fonction, le premier objectif est de planifier un chemin sans collision liant le point où le robot est situé à la destination projetée. Pour ce faire le robot doit déterminer où il est situé et où est son but. Cette détermination est faite au moyen d'une carte globale de l'environnement que le robot possède en mémoire.

Ce problème a suscité un grand intérêt dans la littérature. Plusieurs solutions ont été développées et implantées. La méthode la plus intéressante fut celle présentée par T. LOZANO-PEREZ.

Bien que cette approche se place dans le cadre de la commande des manipulateurs, elle présente un aspect de généralité suffisant pour être éventuellement applicable à un robot mobile. Cet algorithme d'évitement d'obstacles polyédraux (polygonaux dans le plan) connus n'utilise pas de grille, mais construit un graphe de visibilité des sommets des obstacles grossis (y compris un point représentant le robot, et le but) qui est utilisé pour la recherche de chemin par l'algorithme A\*.

L'originalité de cet algorithme tient dans la méthode de grossissement des obstacles en deux ou trois dimensions. Cette méthode tient compte non seulement de la forme du robot mobile, mais aussi du type de déplacement. Pour une translation, le grossissement des obstacles est effectué en calculant le lieu d'un point de référence du robot mobile quand celui-ci accomplit des translations qui l'amènent à entrer en contact avec l'obstacle à grossir (Figure IV.4.).

Dans notre robot on a utilisé cette même procédure de transformation des obstacles de sorte que le problème est devenu celui de *planifier un chemin pour un point à travers des obstacles grossis prenant en considération les dimensions du robot et aussi le type de manoeuvre à effectuer.*

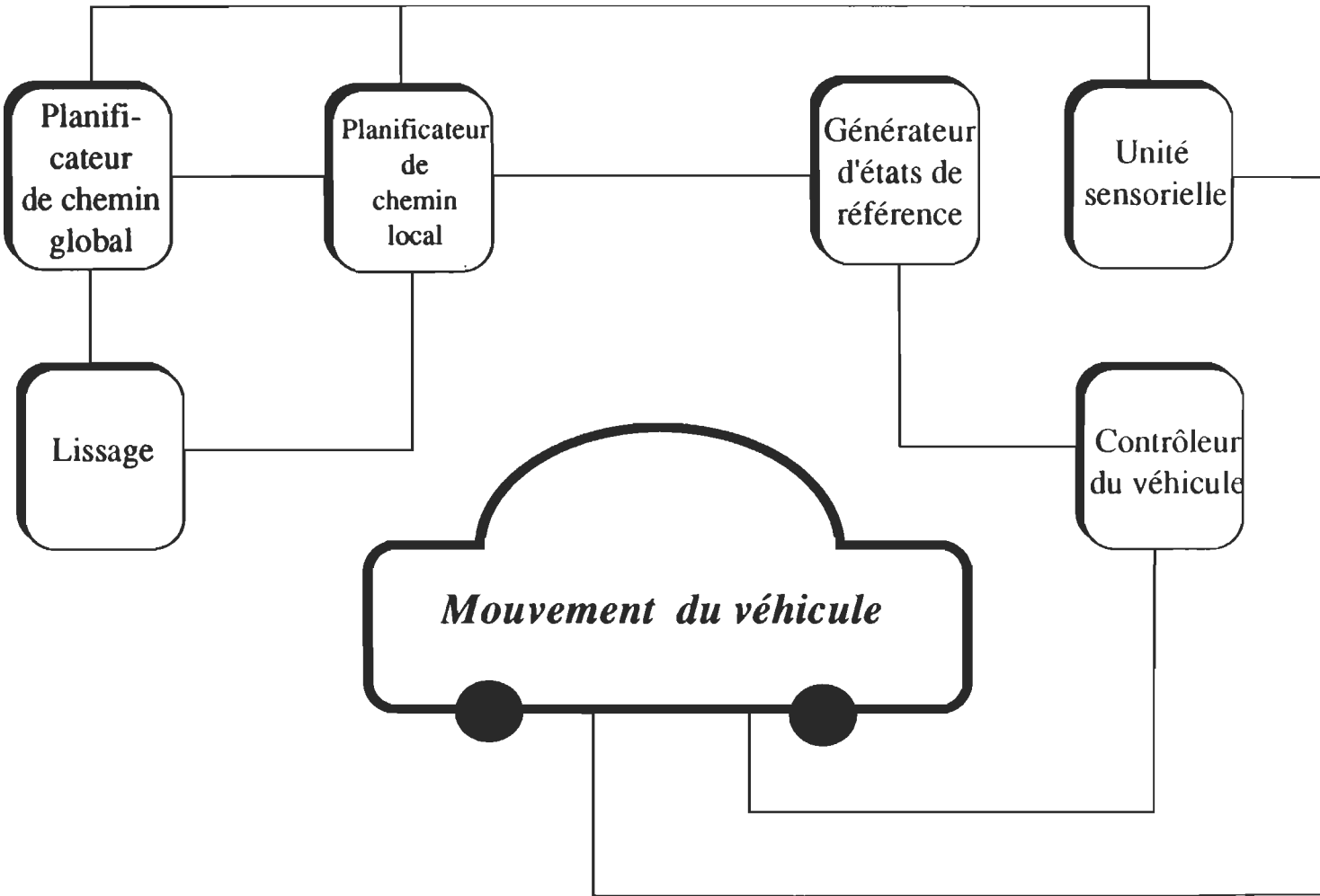


Figure IV.3- Schéma de contrôle global



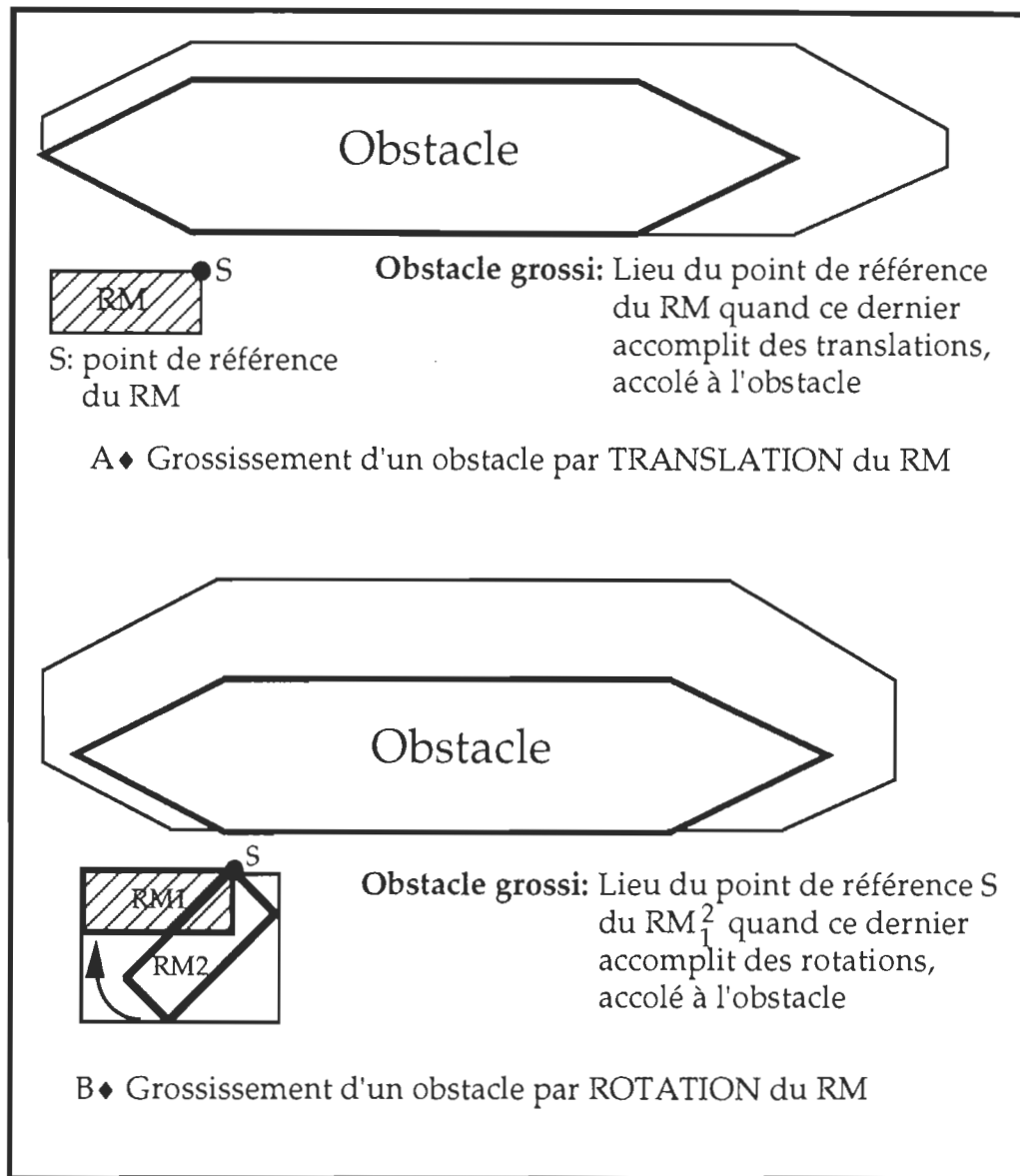


Figure IV.4- Technique de grossissement des obstacles

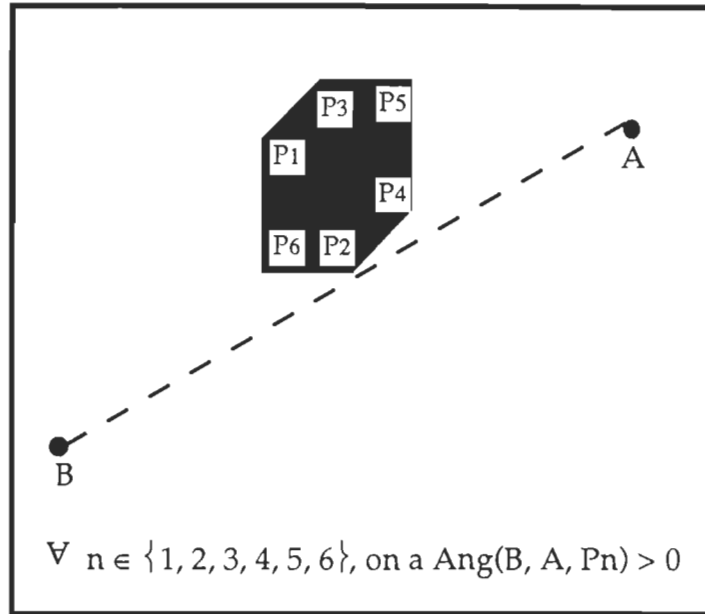
Le principe de l'algorithme développé au sein du GRÉI afin de générer un chemin global pour le robot mobile dans son environnement évolutif sera décrit en détail dans cette section.

### II. 2.1.1 Description de l'algorithme

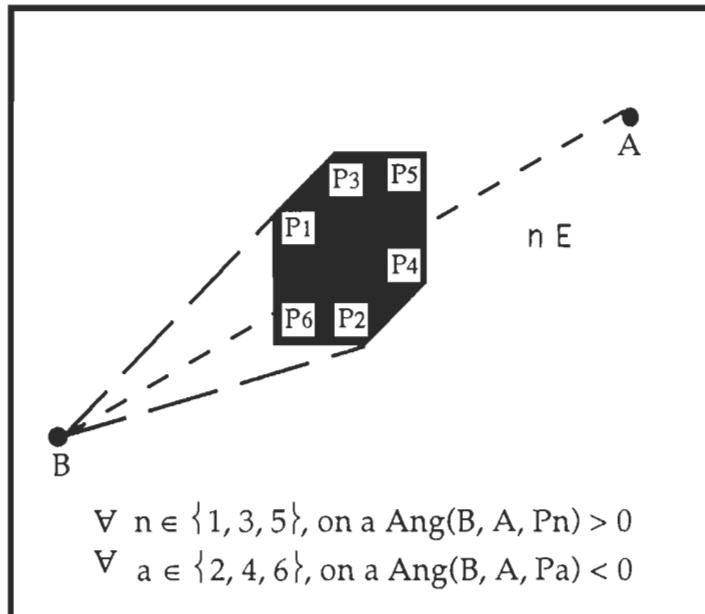
Le processus de recherche de trajectoires consiste en la détection de tout obstacle se trouvant sur le trajet AB, A étant considéré comme point de départ et B comme point d'arrivée; en effet, le trajet initial étant la droite AB, la présence d'un obstacle sur ce segment doit entraîner une modification du trajet initial si on désire que le RM n'entre pas en collision avec l'obstacle obstruant son chemin projeté.

#### 1) Test de détection

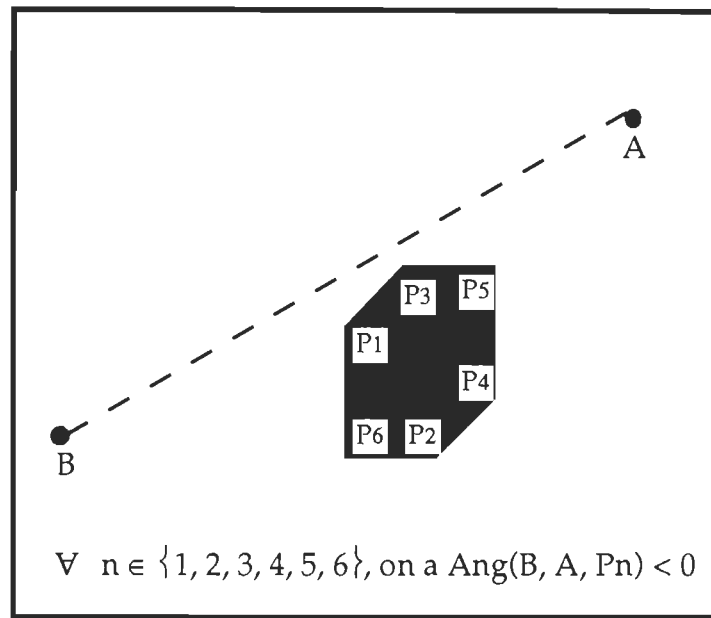
Seuls les obstacles susceptibles d'avoir des angles de signes contraires entre leurs points et les points du trajet AB doivent être considérés comme devant être contournés pour atteindre le point d'arrivée. Comme le montre les figures IV.5-1.a et IV.5-1.c où l'ensemble des angles formés par les points de l'obstacle sont de même signe, l'obstacle n'est pas considéré comme devant être contourné.



(a)



(b)



(c)

Figure IV.5-1 Différentes situations pour les obstacles à considérer

Par contre la figure IV.5-1.b nous montre l'existence d'angles tant négatifs que positifs donc l'obstacle doit être contourné.

L'existence d'angles de signes contraires signifie que des points de l'obstacle se trouvent de part et d'autre de la droite AB. Pour éviter toute collision entre le RM et l'obstacle en question nous devons considérer deux points ( $P_1$  et  $P_2$ ) de ce dernier tel que:

$$\text{Ang}(P_1, A, B) > 0 \text{ et } \text{Ang}(P_2, A, B) < 0$$

$P_1$  et  $P_2$  étant les deux points par lesquels l'obstacle est contourné. Donc tout obstacle à éviter est contournable à deux endroits.

Pour que ( $P_1$  et  $P_2$ ) soient les points les plus extrêmes de l'obstacle, nous devons considérer les angles positif et négatif maximum en valeur absolue; c'est-à-dire l'angle positif le plus grand et l'angle négatif le plus petit.

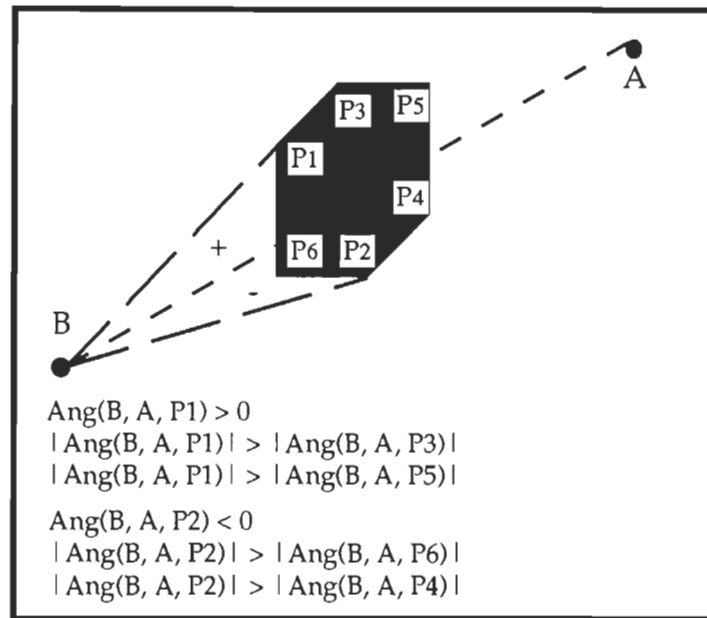


Figure IV.5-2 Obstacle détecté

Ainsi, comme le montre la figure IV.5-2,  $\text{Ang}(P_1, A, B)$  et  $\text{Ang}(P_2, A, B)$  sont extrêmes.

## 2) Procédure utilisée

La partie de détermination de trajectoire, constitue sans conteste l'élément clef de recherche et la base en est le test de détection, dont le principe a été expliqué plus haut. Mais il n'en demeure pas moins qu'il existe d'autres éléments qui nous permettent de contourner des difficultés liées à la complexité de la recherche.

Pour appayer l'explication de la procédure utilisée, on va l'illustrer par un exemple. Supposons que nous sommes dans un atelier manufacturier de dimension , possédant sept machines et/ou objets pouvant être considérés comme obstacle dont les dimensions ont été augmentées suivant la technique de Lozano-Perez ci-haut mentionnée. Considérons le point A, comme la position initiale du RM. Notre objectif est de faire en sorte que le RM puisse atteindre le point B (position finale), en utilisant la trajectoire minimale tout en évitant les obstacles se trouvant sur le trajet initial du parcours (segment AB) ( voir figure IV.5-3)

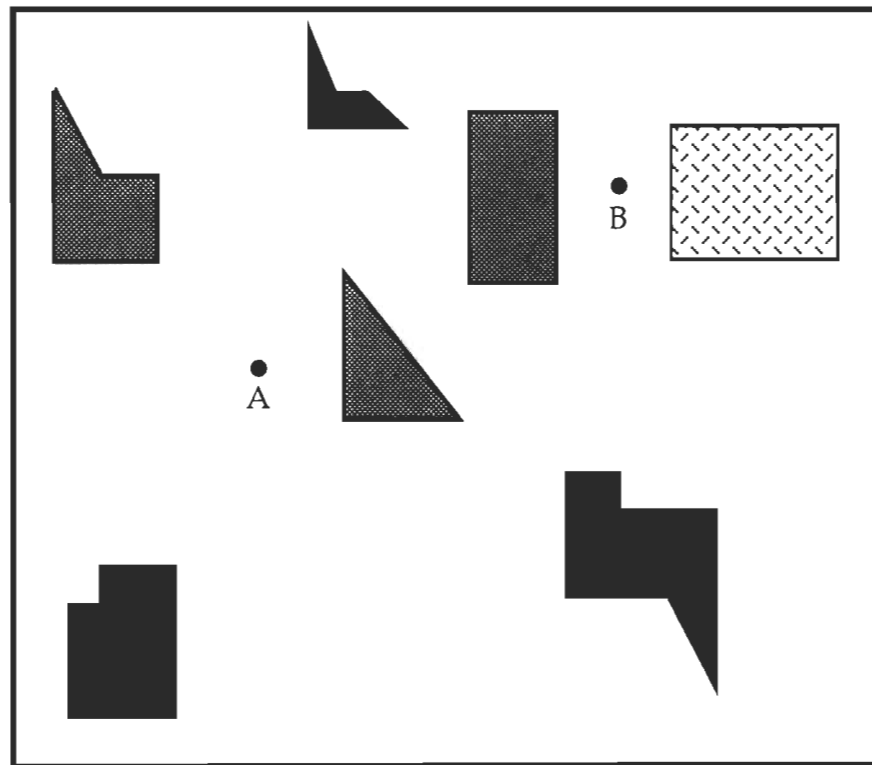


Figure IV.5-3 Carte de l'environnement de travail du RM

### 3) Identification des obstacles

Par le test de détection, nous pouvons déterminer si un obstacle se trouve sur une droite donnée, mais il ne nous permet pas de savoir si l'obstacle détecté se trouve sur le segment ou à l'extérieur de ce dernier. Nous avons ajouté le test de détection à d'autres éléments de la partie identification d'obstacles, qui n'est en fait qu'un test de détection raffiné nous permettant de palier à l'inconvénient ci-haut mentionné.

L'identification d'obstacles est particularisée par le fait que l'objectif visé est de réduire le nombre le nombre des obstacles à traiter pour qu'il y en ait qu'un seul ou pas du tout. Cette partie est constitué de plusieurs étapes que voici:

*étape 1*— L'atelier, suivant sa configuration, est partagé en quatre cadrans dont le point de centre est le point de départ A. Il est constitué de sept (7) obstacles telque représenté dans la figure IV.5-4. Nous allons réduire le nombre des obstacles à traiter à ceux dont l'un des points se trouve dans le même cadran que le segment AB.

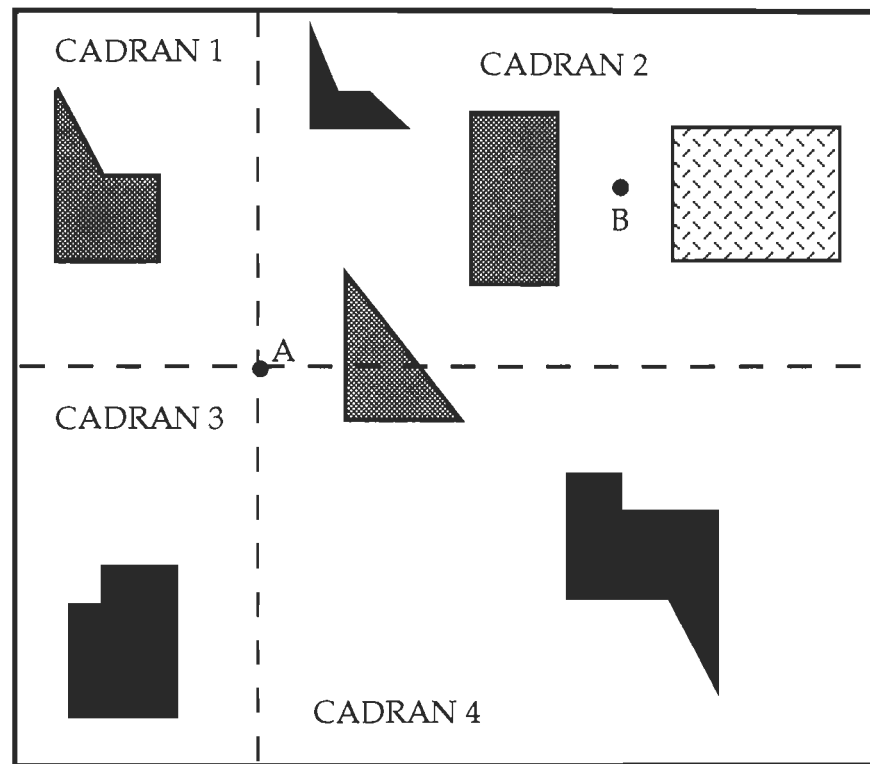


Figure IV.5-4 Division de l'environnement en quatre (4) cadrans

Suivant les valeurs des coordonnées du point B, on peut avoir l'un ou l'autre des cadrans à étudier.

$X_A > X_B$ et $Y_A < Y_B$	Cas I
$X_A < X_B$ et $Y_A < Y_B$	Cas II
$X_A > X_B$ et $Y_A > Y_B$	Cas III
$X_A < X_B$ et $Y_A > Y_B$	Cas IV



Le cadran qui nous intéresse sera celui qui contient le point d'arrivée B et seuls, les obstacles dont l'un des points P au moins s'y trouve, seront sélectionnés pour l'étape future.

*étape 2*— sélection des obstacles dont au moins l'un des points P est séparé de A d'une distance euclidienne inférieure à celle de AB.

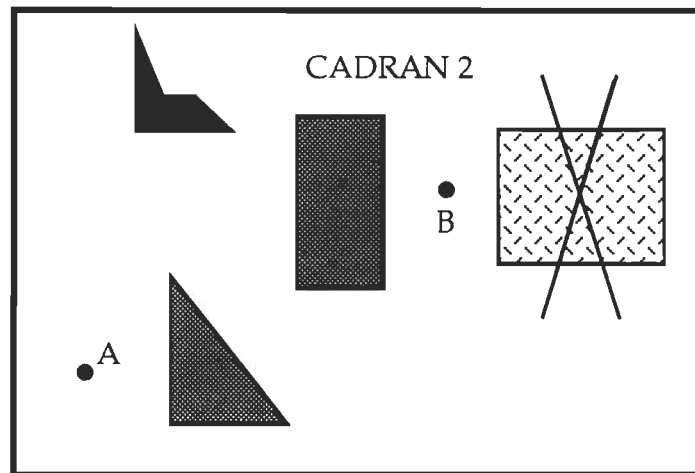


Figure IV.5-5 Élimination d'obstacles par critère de distance par rapport au point de départ

À l'issue de cette étape on constate une réduction des obstacles à traiter pour l'étape suivante.

*étape 3*— Dans le but de sélectionner uniquement les obstacles situés sur l'espace délimité par le segment AB, nous allons considérer B comme point de départ et A comme point d'arrivée et avec cette inversion nous allons refaire l'étape 2 avec les obstacles qui y ont été sélectionnés.

étape 4— Parmi tous les obstacles sélectionnés à l'étape 3, nous ne conservons que ceux qui auront des points  $P_1$  et  $P_2$  tels que  $\text{Ang}(P_1, A, B)$  est positif maximum et  $\text{Ang}(P_2, A, B)$  est négatif minimum (voir Figure IV.5-6).

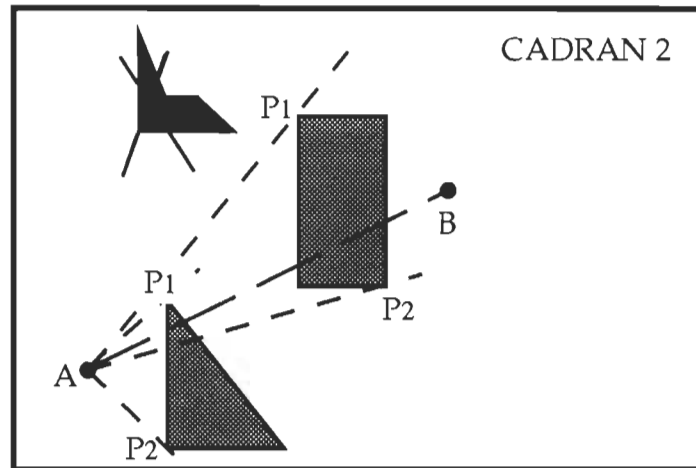


Figure IV.5-6 Élimination d'obstacles par test de détection

étape 5— Élimination des obstacles dont la distance euclidienne minimale entre  $AP_1$  et  $AP_2$  est supérieure à  $AB$ .

étape 6— l'ordre de priorité des obstacles sélectionnés va être déterminé par la distance euclidienne de priorité minimale au niveau de chaque obstacle: cette distance de priorité n'est autre que la distance maximale entre  $AP_1$  et  $AP_2$  points de contours des obstacles.

#### 4) Détermination des points de contour

Les étapes 5 et 6 de l'identification des obstacles nous auront permis de déterminer l'obstacle à contourner en premier et les deux points de contour ( $P_1$  et  $P_2$ ).

A ce niveau, si deux trajectoires sont disponibles  $(A, P_1, B)$  et  $(A, P_2, B)$ , ils sont tous deux traités par deux microprocesseurs différents. Par la suite, les segments à étudier sont ceux limités par les nouveaux points introduits à savoir  $AP_1$  et  $AP_2$  et le processus reprend à partir du début.

Ce PCG fournit un chemin de parcours comprenant une liste de segments de parcours de deux types:

- ♦ des lignes droites,
- ♦ des arcs de cercles

Ces segments représentent les chemins optimaux (distance minimale) entre deux points origine et but.

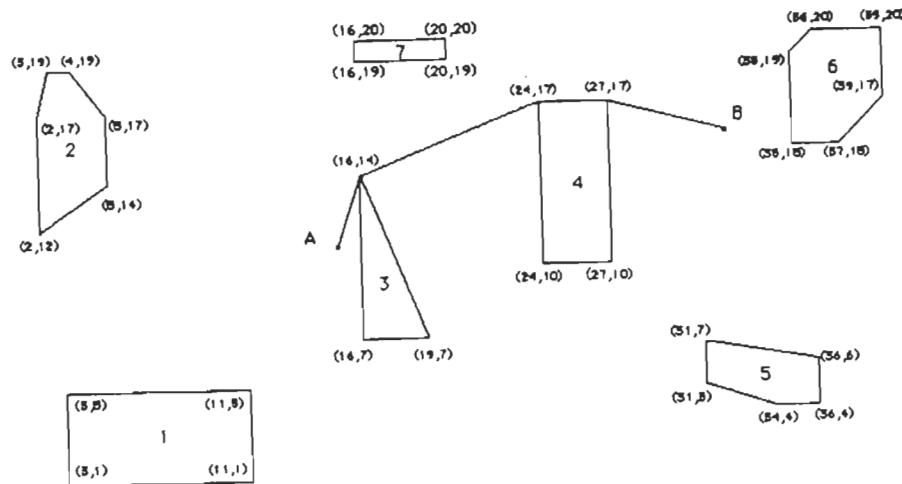


Figure IV. 5-7 Exemple de trajectoires générées par l'algorithme

## II. 2.2 Lisseur

Un second algorithme est aussi nécessaire pour lisser le chemin produit et calculer les contraintes dues à la dynamique du robot. En effet, quand on développe un chemin de parcours sans tenir compte de la dynamique du système ce chemin peut être non réaliste et surtout non efficace pour diriger le robot à sa destination.

La sortie du lisseur est une description complète de la trajectoire qui sera l'entrée du planificateur local (PCL).

Le lisseur comprend, comme le montre la figure IV.6, deux entrées principales et deux paramètres:

- ♦ lissage désiré
- ♦ commutateur de mode

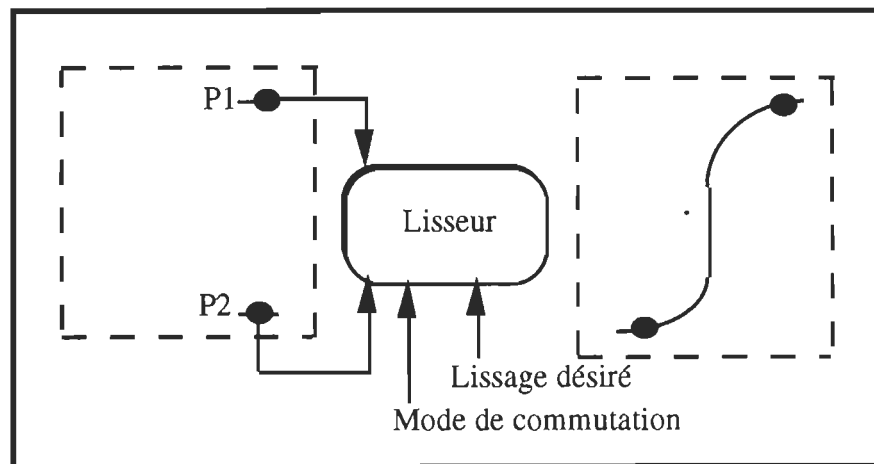


Figure IV.6- Principe du lisseur

### II. 2.3 Planificateur local de chemin

Le planificateur local de chemin est plus précis que le planificateur global du fait qu'il faut produire des mouvements précis. Ce système doit fonctionner en temps réel lors du déplacement du robot. Il se divise en deux sous-unités comme le montre la figure IV.7:

- ♦ Détection de collision,
- ♦ planification d'un chemin d'évitement.

La détection de collision *reconnaît l'existence d'un objet dans le chemin du robot*; alors que le planificateur de chemin d'évitement *produit un chemin local sans collision autour de l'objet*.

La tâche de détection de collision signifie aussi bien:

- la détermination des distances séparant le robot aux obstacles,
- la relation liant les objets, le robot et son chemin projeté.

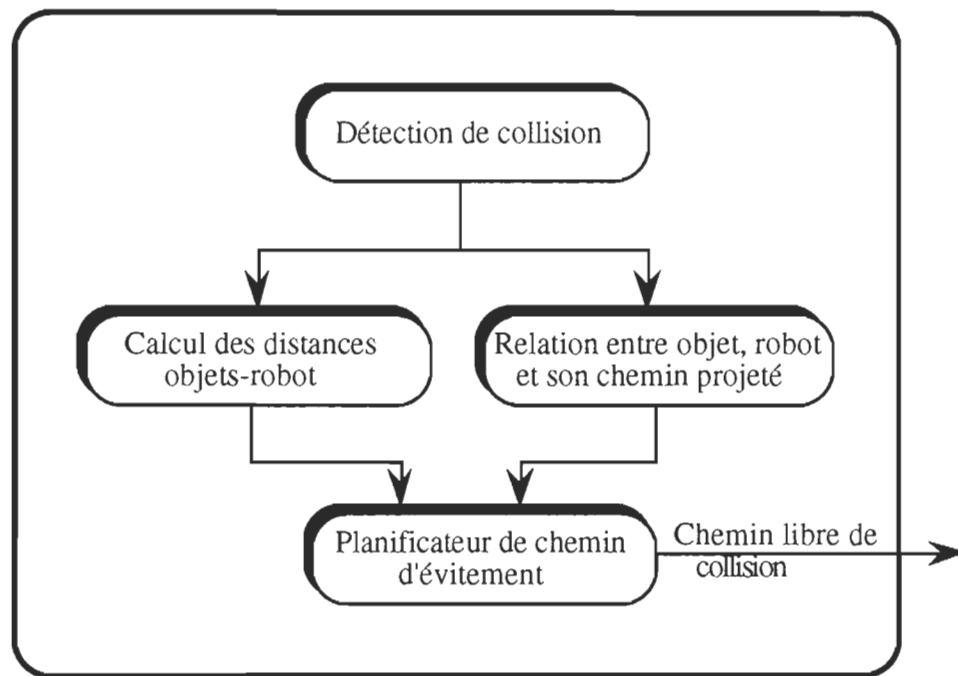


Figure IV.7- Différentes unités du planificateur local du chemins

Tout ce calcul se fait sous la contrainte que le robot se déplace. C'est pourquoi le robot doit prendre des mesures avant une certaine distance critique  $D_c$  afin de faciliter le processus de planification pour éviter une collision avec l'objet comme le montre la figure IV.8.

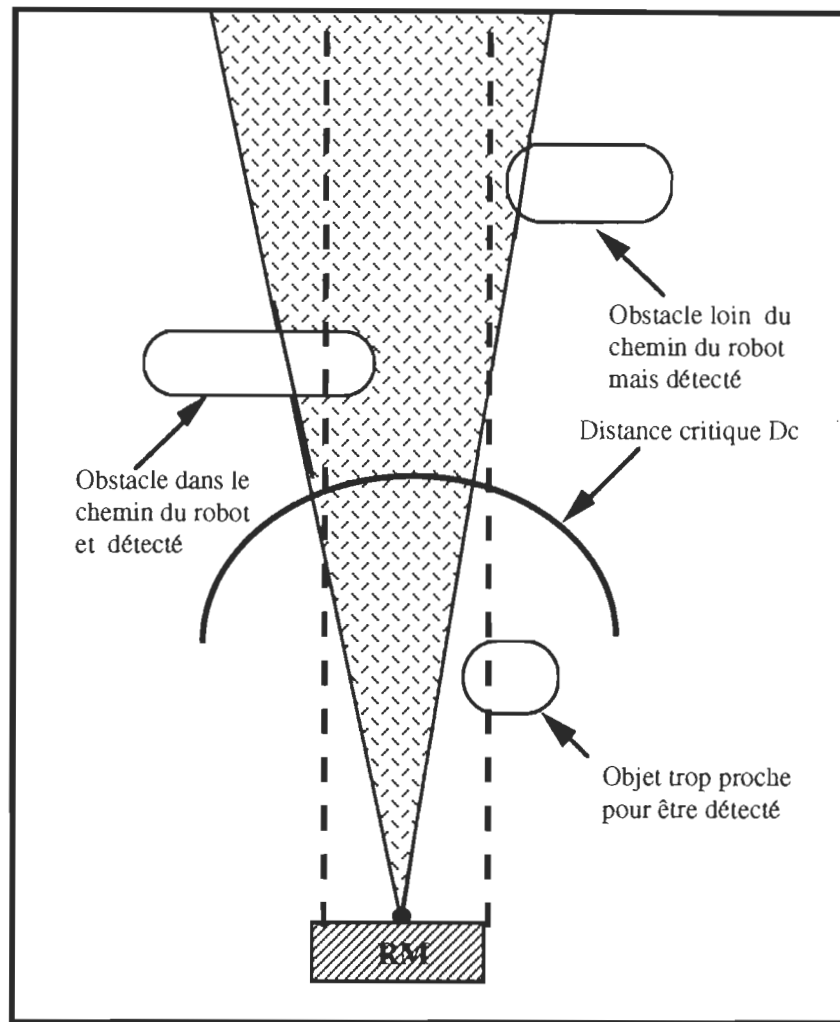


Figure IV.8- Contraintes appliquées au planificateur de chemin local

### II.2.3.1 Description de l'algorithme

Quand le robot est en phase d'approche d'un obstacle (*le minimum des trois distances centrales  $Dis_{min}$  est inférieure à 1 m*), la stratégie de navigation emploie un algorithme qui oriente le véhicule vers l'espace libre afin d'éviter les collisions.

La présence d'un obstacle est détectée lorsque les lectures successives des distances présentent une discontinuité (la distance s'accroît brutalement par rapport à  $D_{\min}$ ). On déduit ainsi l'existence d'un passage entre le mur et l'obstacle.

La procédure de contournement de ce dernier s'effectue en deux phases:

(a) Tout d'abord, le robot tend à s'orienter dans la direction de la plus grande distance, ce qui correspond, à priori, à la meilleure issue possible (figure IV.9):

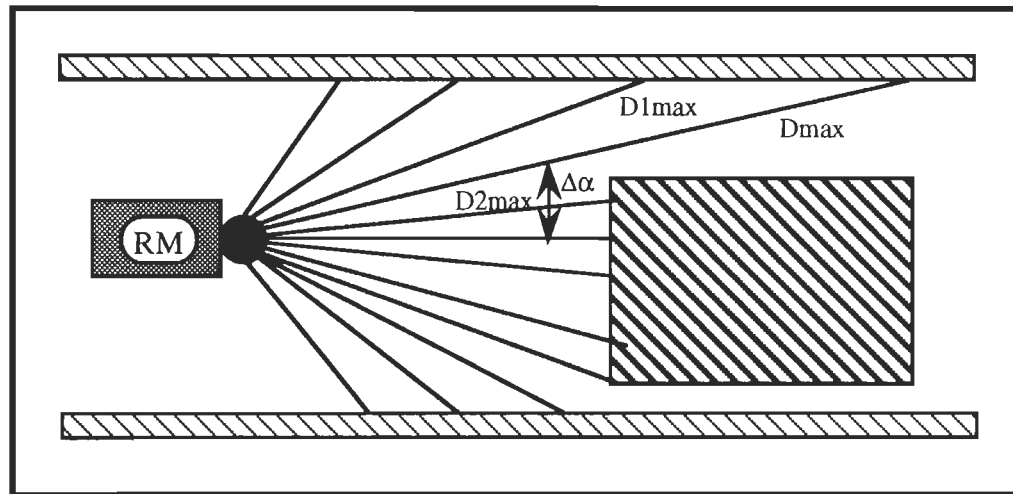


Figure IV.9- Procédure de contournement d'un obstacle par le robot

où  $\Delta\alpha$  est l'angle entre la direction de la distance minimale mesurée ( $D_{\min}$ ) et la direction de la distance maximale mesurée ( $D_{\max}$ )

Le robot choisit comme direction de son déplacement l'angle qui correspond à la plus grande distance.



Pour ce faire, on lui applique une direction de commande  $\alpha_c$  telle que:

$$\alpha_c = \Delta\alpha \quad \text{c-à-d} \quad \alpha_c = \frac{(6-I_{\max})12.6 \pi}{180} \quad (9)$$

où  $I_{\max}$  est l'indice de la direction de la plus grande distance  $D_{\max} = D(I_{\max})$ .

Une situation critique existe lorsque  $\Delta\alpha = 0$ . En effet,  $D_{\max} = D(6)$  et  $D_{\min} = D(5)$  ou  $D(7)$ , sont donc de directions voisines l'une de l'autre. L'appareil qui souhaite poursuivre sa route dans la direction de  $D(6)$  pourra heurter l'obstacle détecté dans la direction de la distance minimale mesurée  $D_{\min}$ .

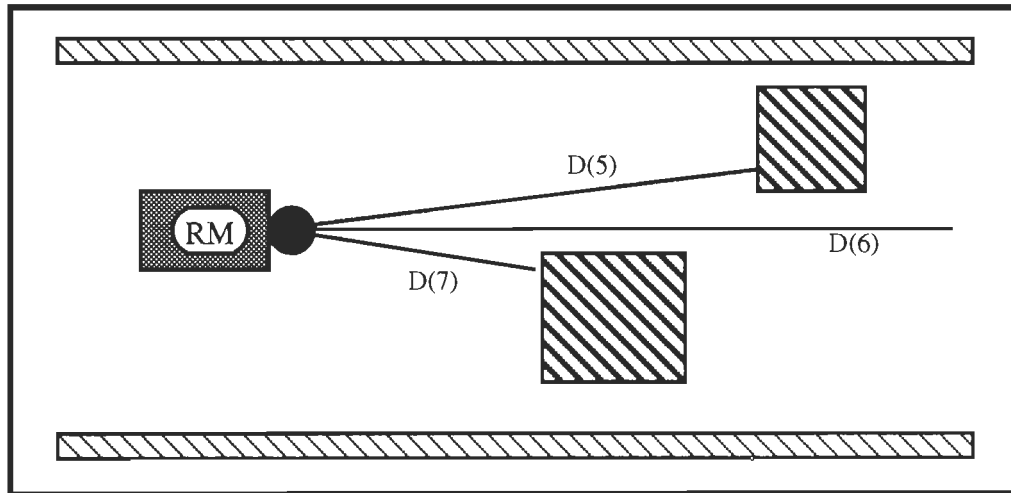


Figure IV.10- Cas critique (  $\Delta\alpha = 0$  )

Afin d'empêcher ceci, on oriente le robot dans la direction opposée à celle de l'obstacle ( Direction  $D(5)$  dans le cas de la figure IV.10).  $I_{\max}$  prendra alors les valeurs suivantes:

$$I_{\max} = 5 \quad \text{si} \quad D_{\min} = D(7) \quad (10)$$

$$I_{\max} = 7 \quad \text{si} \quad D_{\min} = D(5) \quad (11)$$

(b) Dans un second temps, le robot se positionne à nouveau au milieu de l'espace disponible. La relation utilisée pour le calcul de  $\alpha_c$  est la suivante:

$$\alpha_c = K.(D_g - D_d) \quad (12)$$

Où  $D_g$  est la distance qui sépare le robot du mur de gauche

et  $D_d$  est la distance qui le sépare du mur de droite

$K$  étant un gain pour améliorer la précision.

Etant donné que l'écartement entre le mur et l'obstacle est relativement étroite et compte tenu des dimensions du robot, il est nécessaire d'avoir un gain de boucle assez grand affectant l'angle de déviation de référence afin de détecter des écarts faibles entre les distances  $D_g$  et  $D_d$ , et permettre ainsi au robot de se déplacer sans heurt entre le mur et l'obstacle.

### II.2.3.2 Les contraintes de contournement d'obstacles

Le robot n'entame une opération de contournement que lorsque l'écart entre l'obstacle et le mur du couloir est suffisant pour permettre son passage.

Pour se donner une marge de sécurité, les deux distances dont les directions sont voisines de celle de  $D_{\max}$  ( $D_{1\max}$  et  $D_{2\max}$  dans le cas de la figure IV.8) doivent confirmer la présence du passage entre le mur et l'obstacle

détecté grâce à la discontinuité enregistrée lors des lectures successives des mesures.

Afin d'empêcher le robot de s'orienter vers des passages trop étroits, il faut satisfaire les trois conditions suivantes:

$$(1) \text{ D}_{\text{max}} - \text{D}_{\text{min}} > S1 \quad (13)$$

$$(2) \text{ D}_{1\text{max}} - \text{D}_{\text{min}} > S2 \quad (14)$$

$$(3) \text{ D}_{2\text{max}} > \text{D}_{\text{min}} \quad (15)$$

où:

$$\text{D}_{\text{max}} = \text{D}(\text{I}_{\text{max}}) \quad (16)$$

$$\text{D}_{1\text{max}} = \begin{cases} \text{D}(\text{I}_{\text{max}} + 1) & \text{si } \text{I}_{\text{max}} > 6 \\ \text{D}(\text{I}_{\text{max}} - 1) & \text{si } \text{I}_{\text{max}} < 6 \end{cases} \quad (17)$$

$$\text{D}_{2\text{max}} = \begin{cases} \text{D}(\text{I}_{\text{max}} + 2) & \text{si } \text{I}_{\text{max}} > 6 \\ \text{D}(\text{I}_{\text{max}} - 2) & \text{si } \text{I}_{\text{max}} < 6 \end{cases} \quad (18)$$

$$\text{D}_{\text{min}} = \text{Min}(\text{D}(5), \text{D}(6), \text{D}(7)) \quad (19)$$

où:

$\text{I}_{\text{max}}$  étant l'indice de direction de la plus grande distance.

Ainsi lorsque les trois conditions précédentes sont remplies, le robot pourra contourner l'obstacle sans heurt. En effet, la longueur  $d$  correspondant à l'écart angulaire séparant les distances  $\text{D}_{\text{max}}$  et  $\text{D}_{2\text{max}}$  est forcément supérieure à la largeur du véhicule.

### II.2.3.3 Tactiques de fin de contournement

Elles sont destinées à éviter que le robot se réoriente vers le milieu du couloir, dès qu'il a perdu de vue un obstacle sans l'avoir totalement dépassé. La démarche suivie consiste à augmenter artificiellement la longueur de l'obstacle, de telle manière que le robot continue à l'éviter fictivement. Lorsque la longueur du trajet effectué par le robot depuis l'instant où l'obstacle est sorti du champ de vision, devient égale à une certaine valeur  $l$  (figure IV.10.), il peut alors tourner sans risque de heurter l'obstacle.

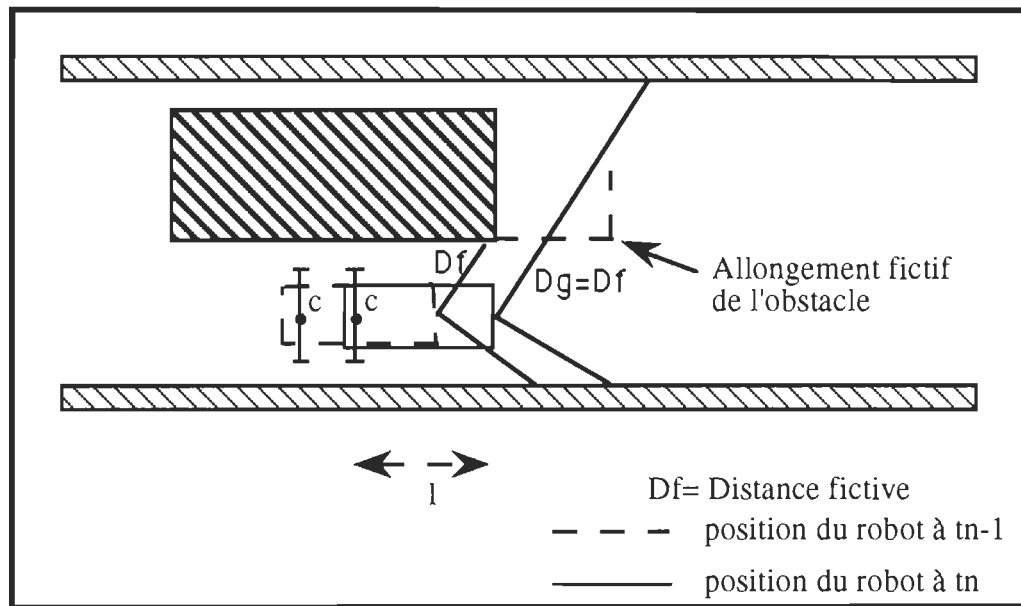


Figure IV.11- Tactiques de fin de contournement

La technique employée est comme suit:

Quand le robot passe à côté de l'obstacle en question, on mémorise au fur et à mesure de son déplacement la plus grande des deux distances  $D_g$  et  $D_d$ , elle sera notée  $D_f$ .

Si à l'instant  $t_n$  il se produit un accroissement brutal

$$D_g(t_n) - D_g(t_{n-1}) > K(m) \quad (20)$$

c'est à dire au moment où l'obstacle sort du champ de vision du robot, on mémorise la position du robot, et à partir de ce moment, la plus grande des deux distances  $D_g$  et  $D_d$  prendra la valeur de  $D_f$  enregistrée à l'instant  $t_{n-1}$ , tant que le robot n'a pas avancé d'une longueur  $l$ .

$$\alpha_c = K (D_g - D_d) \quad (21)$$

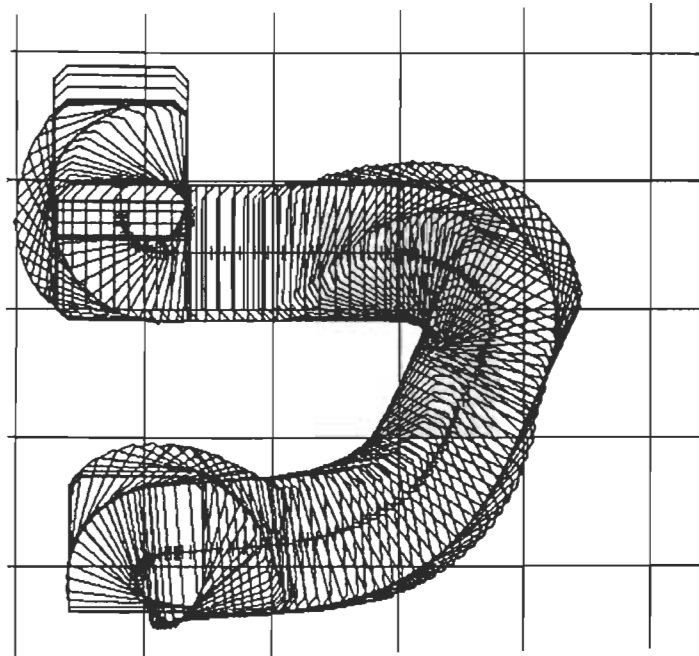


Figure IV.12- Exemple de contournement d'obstacles généré par l'algorithme

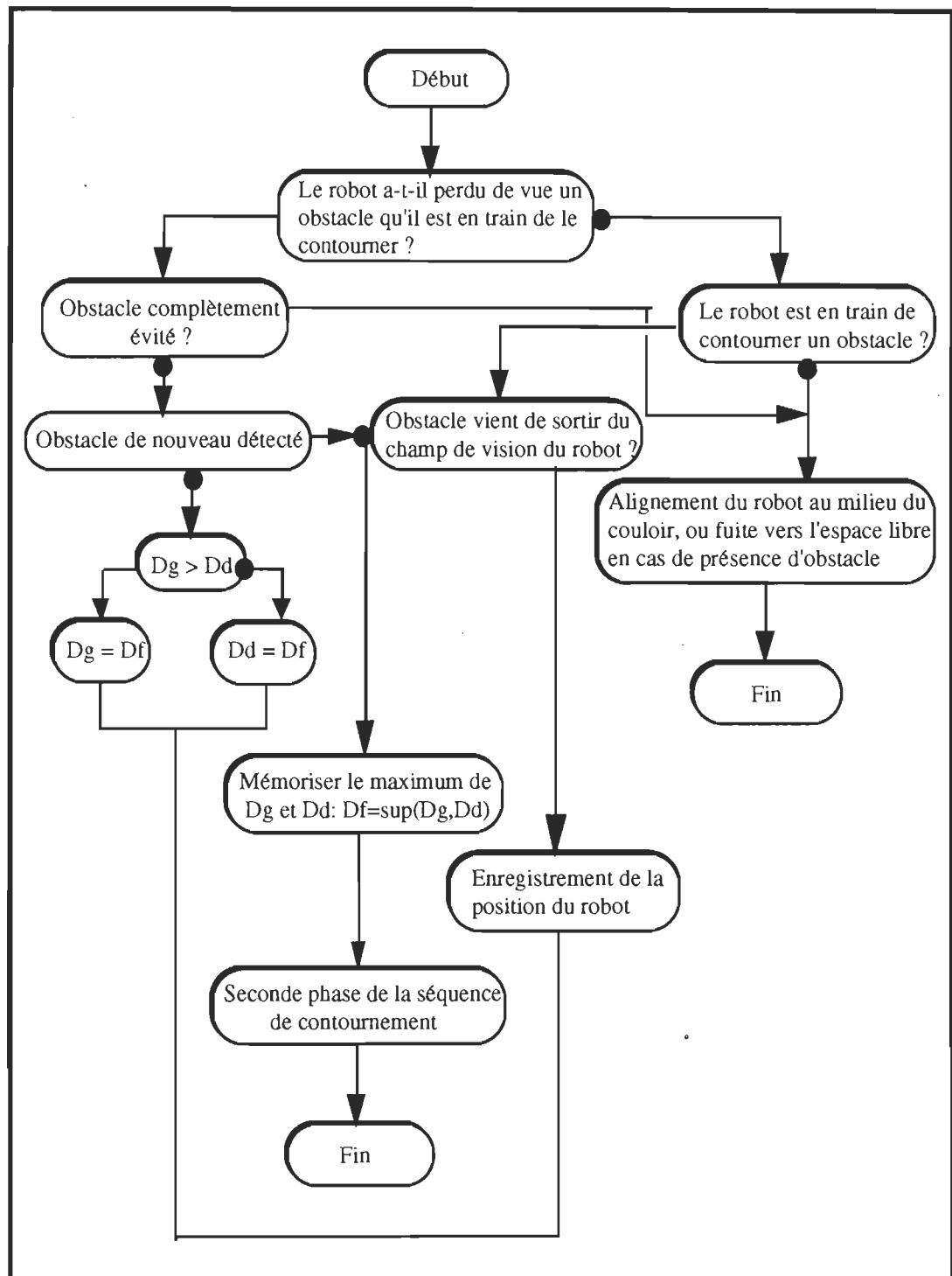


Figure IV.13- Organigramme du contournement d'un obstacle

## II.2.4 Générateur d'états de référence (GER)

L'avantage principal de ce schéma de guidage par GER sur celui point-par-point est que ce dernier à cause des erreurs de mesure ne peut pas détecter le point auquel l'algorithme de contrôle doit commuter au nouveau point cible et par conséquent, peut rater de faire les transitions appropriées pour passer d'un segment de parcours à un autre.

Le GER présente un moyen pour contrôler à bord l'état de fonctionnement du véhicule. En effet, sous des conditions normales de fonctionnement, la différence entre les états mesuré et de référence du véhicule devra être faible. Si cette erreur dépasse une certaine limite bien établie, le véhicule commence à fonctionner de façon anormale. Ainsi le contrôleur du véhicule peut détecter les erreurs anormales pour signaler au planificateur de chemin de prendre une action remède. Avec ce moyen, les mauvais fonctionnements du système tels que pannes au niveau des moteurs, ou bien odométrie peuvent être détectés à temps pour que le véhicule s'arrête de façon sécuritaire.

Un autre avantage pour ce schéma adopté est qu'il représente une séparation convenable entre la logique du chemin de guidage et la logique du contrôleur.

L'état de référence est déterminé par trois facteurs:

- (1) le plan de parcours,
- (2) le pouvoir d'accélération et de décélération du véhicule,

(3) l'état de fonctionnement du véhicule.

Le GER communique avec les calculs géométriques pour transformer le plan de parcours en données temporelles et aussi avec les anomalies qui nécessitent des modifications locales du chemin.

Le GER reçoit le chemin produit sous formes de segments (des droites ou des arcs de cercle). A chaque cycle de contrôle il calcule:

- l'état de référence du chemin,
- la vitesse angulaire de référence,
- la direction de référence,
- et la distance qui reste pour atteindre la fin du segment en cours.

Quand cette distance devient inférieure à la distance séparant les points de référence précédent, le GER demande au planificateur de lui fournir le segment suivant et commence à générer des états de référence le long du nouveau segment.

#### **II. 2. 4.1 Génération de la vitesse de référence**

Le GER utilise des profils de vitesse compatibles avec les accélérations et vitesses limites recommandées par le système d'entraînement.

Pour un démarrage à partir d'un arrêt et pour des changements de vitesse entre les segments, on programme une variation sous forme d'une rampe limitée par le pouvoir d'accélération du moteur utilisé. Pour la fin des



segments et pour des arrêts d'urgence le long du chemin, une rampe décroissante en vitesse basée sur un gain  $G_r$ , multipliant la distance restante du point d'arrêt à atteindre, est programmée afin d'assurer des arrêts doux et sans dépassements. La valeur de  $G_r$  doit être choisie de façon à assurer un certain compromis. La valeur de  $G_r$  doit être suffisamment grande de sorte que le véhicule puisse atteindre le point d'arrêt, mais non assez grande pour ne pas dépasser les capacités de décélération du moteur (voir figure IV.14).

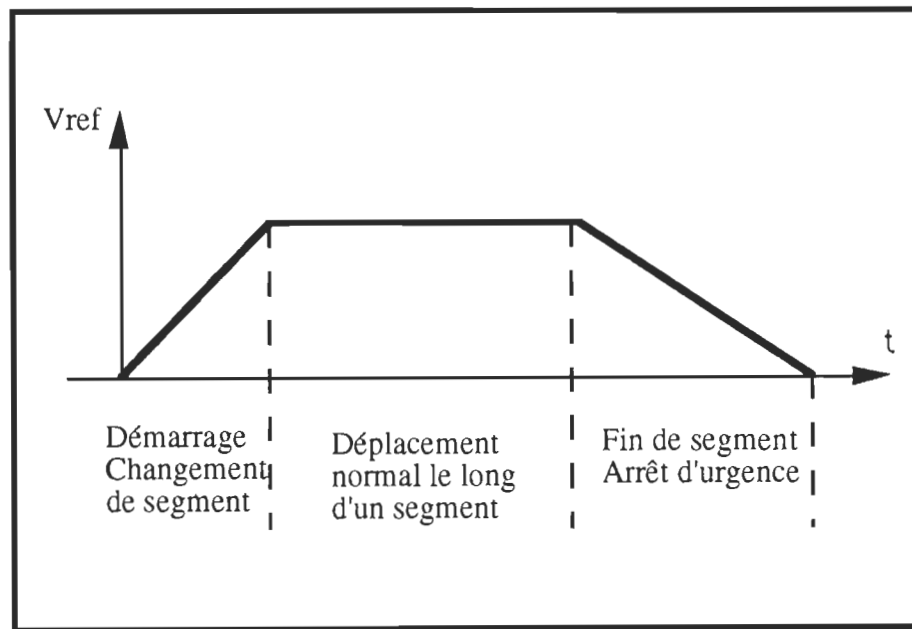


Figure IV.14- Exemple de profile de vitesse de référence générée

## II. 2.4.2 Génération de position et orientation de référence

On va commencer cette section par certaines définitions nécessaires pour le calcul de la position et de l'orientation de référence. Ces calculs dépendent du type de segment ( ligne droite ou arc de cercle).

### a) Définitions

On désigne par:

- $E_f = [X_f, Y_f, \theta_f]^T$  l'état à la fin du segment en cours
- $E_d = [X_d, Y_d, \theta_d]^T$  l'état au début du segment. Elle est l'état à la fin du segment précédent.
- $E_a = [X_a, Y_a, \theta_a]^T$  l'état de référence antérieur, à l'instant  $t$ , transformé dans le système de coordonnées dont l'origine est  $(X_d, Y_d)$ . Son axe d'abscisse est aligné avec  $\theta_d$ :

$$E_a = B \cdot (E_r(t-T) - E_d) \quad (22)$$

Où  $T$  est l'unité de calcul des segments du parcours.

La matrice  $B$  de transformation de base est donnée par:

$$B = \begin{bmatrix} \cos \theta_b & \sin \theta_b & 0 \\ -\sin \theta_b & \cos \theta_b & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (23)$$

Cette transformation utilisée permettra de simplifier les calculs.

- $E_p = [X_p, Y_p, q_p]^T$  vecteur de position-orientation projeté sur ce nouveau système de coordonnées.
- $E_e = [X_e, Y_e, q_e]^T$  transformée du vecteur  $E_d$  dans le nouveau système de coordonnées:

$$E_e = B.(E_f - E_d) \quad (24)$$

- $\alpha_r$  direction de référence
- $\omega_r$  vitesse angulaire de référence

Ces deux grandeurs sont nécessaires pour entraîner le véhicule le long du segment de parcours actuel quand l'erreur entre l'état de référence et mesurée est nulle.

## b) Spécification des segments

- *Segment de ligne droite*

Dans ce cas le mouvement incrémental du véhicule le long de l'axe X transformé est une séquence de  $V_{ref}.T$ . Par conséquent, le vecteur d'état projeté le long du segment est:

$$E_p = [X_v + V_{ref}.T, 0, 0]^T \quad (25)$$

La direction de référence et la vitesse angulaire d'entraînement ont les expressions suivantes:

$$\alpha_r = 0, \quad \omega_r = \frac{V_{ref}}{R} \quad (26)$$

où R est le rayon de la roue motrice et directrice du véhicule.

- segment en arc de cercle:

Dans ce cas, le rayon de courbure est calculé comme étant égale à:

$$r_c = \frac{Y_e}{1 - \cos \theta_e} \quad (27)$$

$Y_e$  et  $\theta_e$  sont les deuxième et troisième éléments du vecteur  $E_e$ .

Ce paramètre possède une amplitude égale au rayon de l'arc avec un signe positif quand le mouvement est dans le sens des aiguilles d'une montre et négatif dans le cas contraire.

Le vecteur d'état projeté le long de l'arc sera:

$$E_p = [r_c \sin \theta_p, r_c (1 - \cos \theta_p), \theta_p]^T \quad (28)$$

où:

$$\theta_p = \theta_a + \frac{V_{ref} \cdot T}{r_c} \quad (29)$$

L'angle de direction de référence ainsi que la vitesse angulaire de référence seront:

$$\alpha_r = \text{Atan}\left(\frac{L}{r_c}\right) \text{ et } \omega_r = \frac{V_{ref}}{R \cos(\alpha_r)} \quad (30)$$

$L$  étant la base du véhicule.

Le vecteur d'état de référence à un instant  $t$ , le long d'un segment (ligne droite, arc de cercle) est obtenu par une simple transformation du vecteur d'état projeté, en retournant à l'espace  $XY$  par une transformation inverse.

$$E_r(t) = B^{-1} \cdot E_p + E_d \quad (31)$$

où  $B^{-1}$  est obtenue tout simplement en interchangeant les éléments non-diagonaux de la matrice  $B$ .

Ainsi la sortie du GER, à chaque cycle, sera formée par:

- le vecteur position-direction,
- la vitesse programmée  $V_{ref}$

ces deux formeront ce que l'on appelle l'état de référence du véhicule,

- la direction de référence  $\alpha_r$
- la vitesse d'entraînement de référence  $\omega_r$ .

Cette sortie sera, comme le montre la figure IV-15, appliquée au contrôleur du véhicule. Ce dernier sera le sujet de la prochaine section.

## II.2.5 Contrôleur du véhicule

La tâche du contrôleur du véhicule est d'entraîner et de diriger la roue arrière du véhicule de sorte que le point CR, centre de rotation, suive de façon précise et rapide les points de référence issus du GER.

Le contrôleur, la partie ombrée de la figure IV.15, consiste en un contrôleur du chemin, deux unités de contrôle de moteurs (entraînement et direction) qui forment les boucles internes du schéma de contrôle. Alors que le contrôleur du chemin forme la boucle externe pour la parfaite suivie de la trajectoire de référence.

### II. 2.5.1 Contrôleur du suivi du chemin

Le contrôleur de chemin génère les variables de commande  $\alpha_c$  et  $\omega_c$ , de la direction et de vitesse d'entraînement en utilisant les valeurs de références  $(\alpha_r, \omega_r)$  issues du GER, et la dérive du robot de sa trajectoire de référence issue de l'unité de filtrage de l'état du véhicule.

Les erreurs de chemin sont décomposées en quatre composantes. Comme le montre la figure IV.16, l'erreur de la distance est divisée en une erreur tangentielle, et, et une erreur normale, en:

$$e_t = (x_r - x_m)\cos\theta_r + (y_r - y_m)\sin\theta_r \quad (32)$$

$$e_n = -(x_r - x_m)\sin\theta_r + (y_r - y_m)\cos\theta_r \quad (33)$$

L'erreur de la vitesse est décomposée en une erreur d'orientation,  $e_h$ , et en une erreur de vitesse,  $e_v$ :

$$e_h = \theta_r - \theta_m, \quad (34)$$

$$e_v = v_{ref} - v_m \quad (35)$$

Où  $\theta_m$  et  $v_m$  sont, respectivement, l'orientation et la vitesse mesurées.

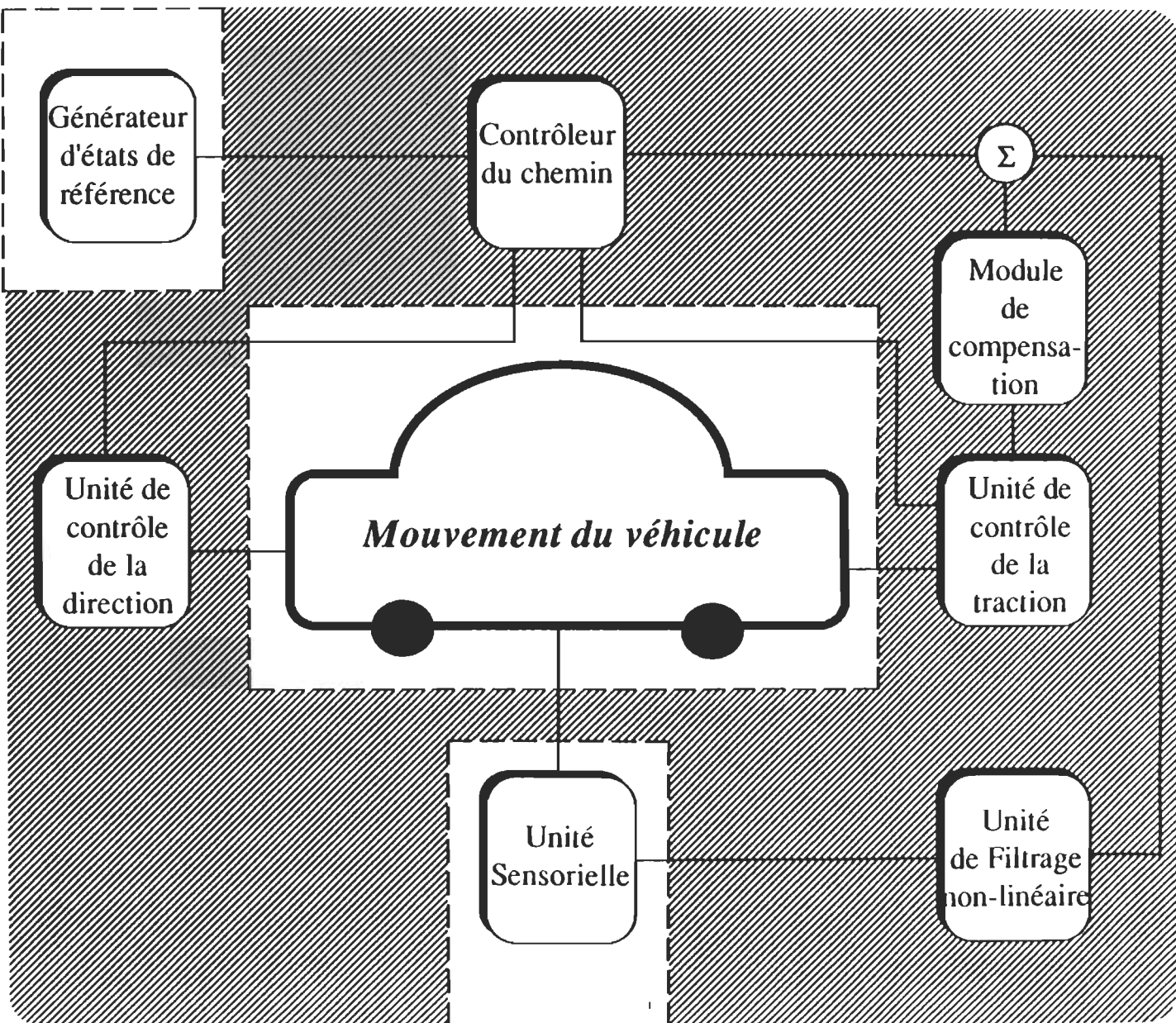


Figure IV.15- Contrôleur du véhicule

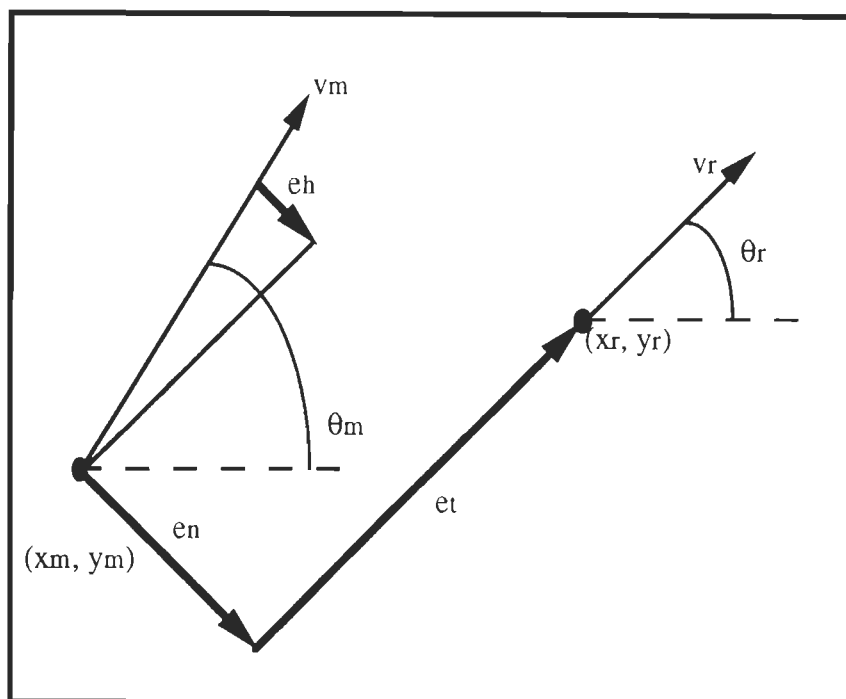


Figure IV.16- Erreur du chemin

Etant donné les valeurs de référence  $\alpha_r, \omega_r$  et ces composantes d'erreurs, les valeurs de la commande générées par le contrôleur du chemin à chaque cycle de contrôle sont données par:

$$\alpha_c = \alpha_r + C_1 \cdot e_n + C_2 \cdot e_h \quad (36)$$

$$\omega_c = \omega_r + C_3 \cdot e_t + C_4 \cdot e_v \quad (37)$$

Il faut remarquer que les valeurs de commande sont égales à celles de référence quand l'erreur est nulle.

Les paramètres  $C_i$  sont choisis afin d'améliorer les performances globales de la poursuite du chemin.



## II. 2.5.2 Contrôleur des unités de traction et de direction

Une carte de contrôle, comme le montre la figure IV.17, se charge du contrôle des moteurs de direction et d'entraînement. Ces unités permettent d'améliorer les performances des moteurs en matière de temps de réponse, et d'erreur.

L'algorithme de contrôle utilisé a fait l'objet d'un projet de fin d'études par un étudiant de l'Université du Québec à Trois-Rivières. On se limite à mentionner que cet algorithme a donné de bons résultats ce qui nous a encouragé à l'adopter.

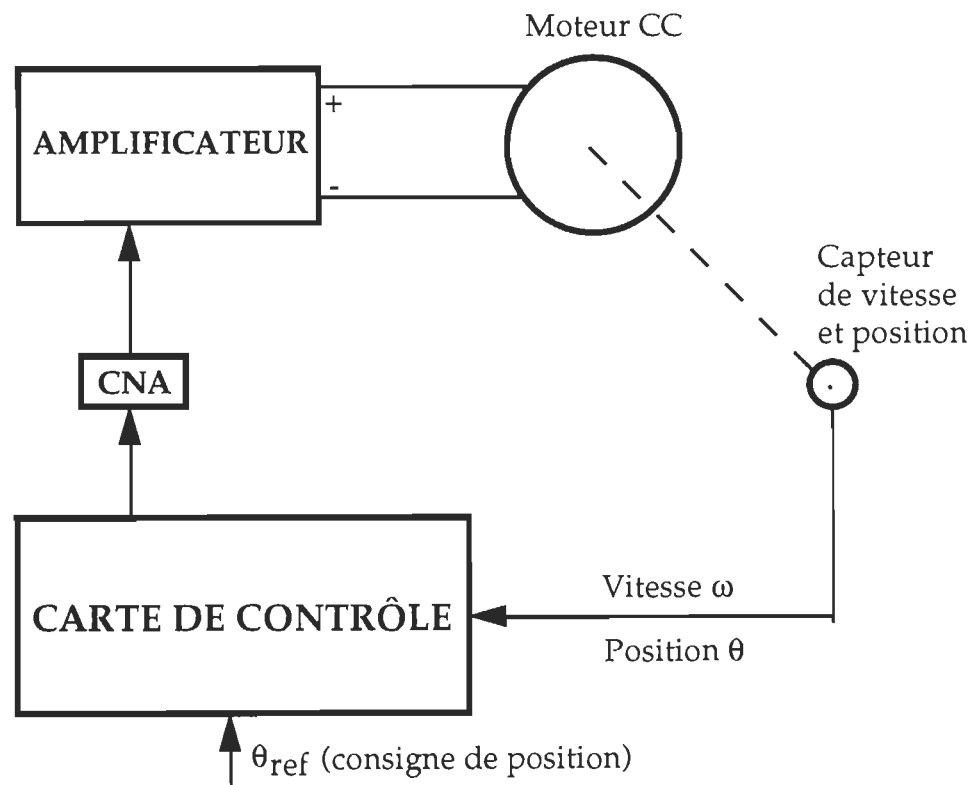


Figure IV.17- Schéma de contrôle des moteurs de direction et de traction

## Chapitre V

# TECHNIQUES D'AMÉLIORATION DE LA LOCALISATION

### I. INTRODUCTION ET POSITION DU PROBLÈME

Dans le problème de guidage des robots mobiles, la manoeuvrabilité du système à commander est limitée par la présence d'obstacles dans le chemin de mouvement. Généralement, l'objectif désiré est formulé comme suit: *"transférer un système dynamique donné d'un état initial I, à un état final F, tout en évitant tous les obstacles obstruant le chemin du mouvement"*. La figure V.1, illustre ceci dans le plan.

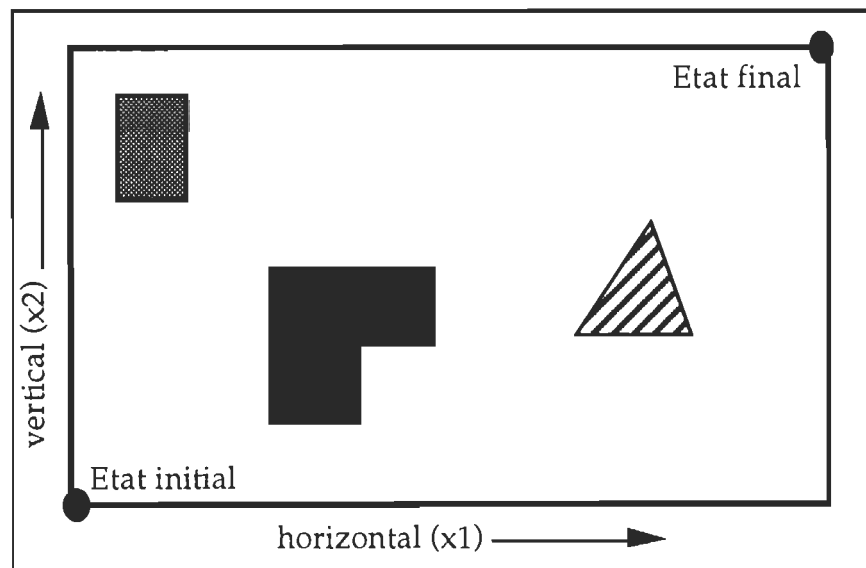


Figure V.1- Principe des robots mobiles

Si on utilise des vitesses de fonctionnement élevées, il faut prendre en considération les quatre contraintes suivantes:

- i) les équations dynamiques du robot,
- ii) les limitations de la commande,
- iii) la présence d'obstacles,
- iv) les erreurs introduites par une mauvaise et incomplète modélisation du système ainsi que par le système de mesure.

Les équations dynamiques représentent le modèle physique du RM c'est-à-dire qu'elles traduisent son comportement.

Plusieurs travaux de recherche axés sur le problème d'évitement des obstacles ignorant cette contrainte dynamique, ont vu leurs efforts aboutir à des trajectoires non-réalistes; la faisabilité de ces trajectoires n'est garantie que lorsque le système se déplace lentement.

Dans les problèmes de poursuites de trajectoires en absence d'obstacles et en ignorant les limitations du système de commande, cette approche entraîne une dégradation des performances du système global. Alors que dans les problèmes de poursuite en présence d'obstacles, l'exclusion de telles limitations dans la formulation du système rend le problème dénué de tout sens physique; le RM peut ainsi se déplacer à une grande vitesse en direction de l'obstacle pour s'arrêter par la suite instantanément au niveau d'un point de contact avec l'objet. Ceci est non-réaliste puisque les moteurs utilisés pour

diriger et entraîner le RM ont des caractéristiques limitées telles que leur couple maximum fourni. Il faut donc que l'action d'évitement des obstacles prenne place bien avant le contact entre le robot et l'objet. Lors de la génération, en temps réel, de chemins libres de collision, l'effet de l'incertitude sur le système en boucle fermée doit être minimisé sinon éliminé. La figure V.2, montre comment de petites perturbations par rapport à une trajectoire nominale, peuvent entraîner une collision du RM avec un obstacle.

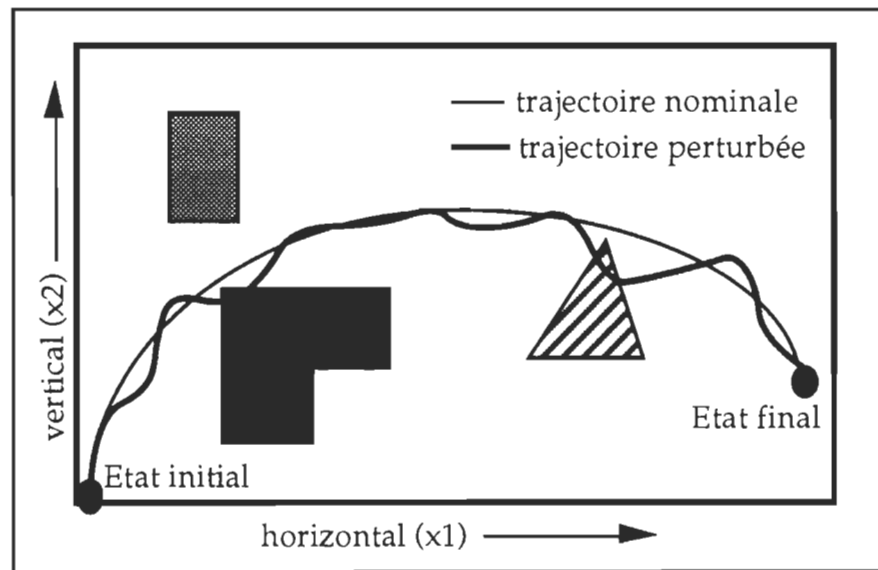


Figure V.2- Effet des perturbations: possibilité de collision

En fait, il y a deux sources d'erreur majeures dans le problème d'évitement d'obstacles:

- 1• La présence de la dynamique des actionneurs qu'on n'a pas, généralement, tenu compte lors de la formulation des équations décrivant le comportement du système. Il est très important de déterminer l'effet de la dynamique des actionneurs sur le reste du système de sorte que le contrôleur puisse délivrer et fournir des performances nettement meilleures.

2• L'effet des erreurs de perception et de localisation. En effet, des informations de mauvaises qualités peuvent entraîner, non seulement de mauvaises performances mais aussi des collisions.

De tout ce qui précède, on voit qu'il est indispensable qu'une intervention auprès de la qualité de la localisation ainsi que de la perception prenne place avant qu'elle soit traitée par le contrôleur. C'est le but de ce chapitre, dans lequel on va présenter en détail les différentes sources d'erreurs qui peuvent gêner le bon fonctionnement du RM. Dans la deuxième section on présentera le principe du filtrage .

## **II. LES DIFFERENTES SOURCES D'ERREUR ASSOCIEES AU SYSTEME SENSORIEL**

### **II.1 Les systèmes télémétriques Ultrasonores**

Les systèmes de mesure télémétriques à base d'ultrasons souffrent de quelques problèmes fondamentaux qui limitent leur utilisation dans les tâches nécessitant une grande précision telle que la modélisation et perception de l'environnement d'évolution d'un robot mobile.

Ces problèmes ne sont pas reliés à un produit spécifique d'un manufacturier mais ils sont propres au principe de fonctionnement des télémètres ultrasonores et leurs longueurs d'ondes les plus couramment utilisées.

Malgré l'utilisation assez fréquentes des télémètres ultrasonores dans plusieurs applications robotisées, il y a uniquement un nombre très limité de

travaux de recherche qui ont donné leurs attentions aux limitations de ces systèmes.

Avant d'utiliser cette technique on a jugé nécessaire d'exposer au lecteur une analyse détaillée des limitations et des sources d'erreurs associées à ce système pour qu'on puisse en prendre compte dans notre approche d'amélioration des systèmes sensoriels adoptés par notre robot mobile.

La figure V.3, montre une partie d'une onde incidente émise par un émetteur ultrasonore S dans la direction d'une surface parallèle d'un obstacle.

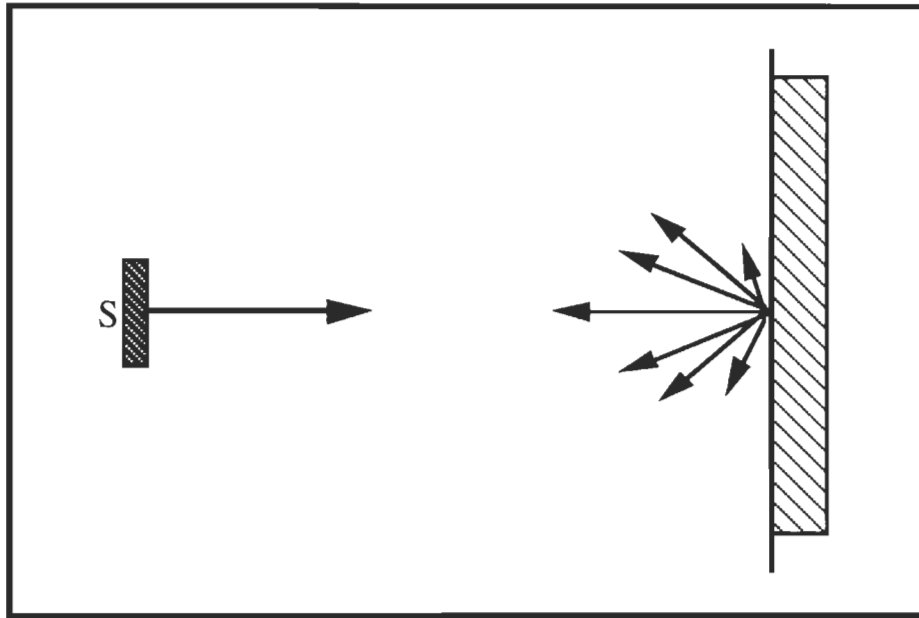


Figure V.3- Réflexion d'ondes sonores à partir d'une surface lisse perpendiculaire à l'axe acoustique

Dans ce cas la majorité de l'énergie sonore est réfléchi perpendiculairement à la surface et sera détectée par le récepteur S alors que seul un petit pourcentage de l'énergie est réfléchi dans les autres directions.

Cependant, si la surface de l'obstacle est inclinée relativement à l'axe acoustique de S comme le montre la figure V.4, dans ces conditions, seulement une faible quantité de l'énergie sera réfléchie vers S. Ce qui veut dire en robotique mobile que l'obstacle n'a pas été détecté alors qu'il est en réalité bel et bien en face du robot ce qui représente un grand problème dans ce cas de la robotique mobile.

Ainsi, il est clair que la quantité d'énergie sonore réfléchie dépend fortement de la structure de la surface de l'obstacle et de sa disposition.

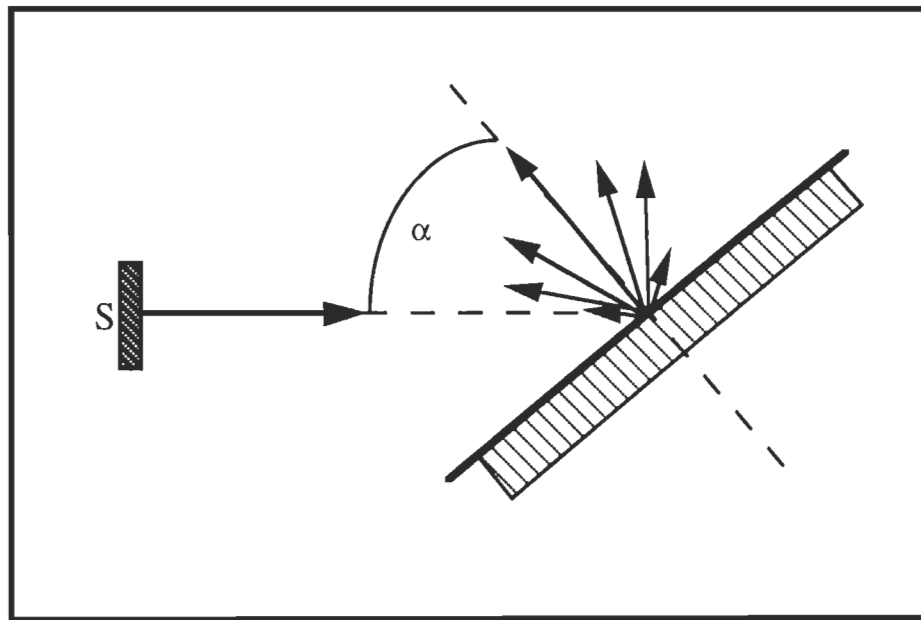


Figure V.4 - Les ondes sonores réfléchies ne sont pas détectées par le transducteur quand l'angle  $\alpha$  est grand

Pour obtenir une bonne reflexion de l'onde à partir d'un obstacle, il faut que la grandeur des irrégularités au niveau de la surface de reflexion soit comparable à la longueur d'onde de l'onde sonore incidente ( le lecteur peut se référer à la référence [3]).

Dans le cas d'une unité télémétrique POLAROÏD, on a:

$$\lambda = \frac{v}{f} = \frac{340\text{m/s}}{50\text{KHz}} = 6.8 \text{ mm}$$

où:

$\lambda$ : longueur d'onde

$v$ : vitesse du son dans l'air à une température ambiante

$f$ : fréquence de l'onde sonore

Malheureusement, l'environnement domestique comprend généralement plusieurs surfaces lisses telles que les murs, les bois polis, les meubles, les plastiques ...etc. L'augmentation de la fréquence (en diminuant la longueur d'onde) de l'onde sonore est limitée à cause de l'indésirable effet de bord d'une dissipation plus élevée d'énergie.

L'angle  $\alpha$  maximum de la figure V.4, pour une détection fiable d'une surface "lisse" est de l'ordre de 25 degrés.

*J. Borenstein et al.* ont trouvé que cet angle peut être augmenté jusqu'à 40 à 45 degrés grâce à des gains plus élevés du circuit du récepteur malgré que ceci peut causer une diminution dans la directionnalité de la mesure et occasionne de fausses lectures des distances mesurés.

Ce problème de directionnalité peut être pris en considération dans l'algorithme d'évitement de l'obstacle . On peut de la même façon remédier au problème des fausses lectures obtenues en lisant toujours une plus courte



distance mesurable à la place de la distance actuelle mesurée. Ces fausses lectures seront donc écrasées tout simplement en écrasant toute distance inférieure à la dite distance limite.

#### • ZONE AVEUGLE

Dans le but de permettre aux vibrations de la membrane du transducteur, après l'émission d'un faisceau sonore, de disparaître avant que la même membrane ne soit utilisée pour détecter les ondes sonores réfléchies, on introduit la notion d'une distance minimale de lecture.

Du point de vue purement technologique, cette distance limite est définie comme étant l'intervalle de temps minimal dans lequel le circuit de réception est incapable de fonctionner.

Si on augmente le gain du circuit récepteur, les vibrations seraient détectées à la fin de l'intervalle du temps minimal, même si elles sont presque complètement disparues. Ces ondes seront donc interprétées comme étant un echo.

L'existence d'une distance minimale introduira dans le télémètre une zone où le capteur n'est pas capable de savoir ce que se passe aux alentours du robot, cette zone est dite zone aveugle. Cet autre problème sera aussi très dangereux si on veut penser à la sécurité du robot.

Un autre problème apparaîtra quand la direction relative à un certain obstacle doit être calculée avec précision.

Le cône d'émission des ondes sonores est montrée à la figure V.5. Dans ce cas, le cône présente un angle d'ouverture de l'ordre de 20 à 30 degrés avec un contenant en énergie croissant dans la direction de l'axe acoustique. La figure V.6, montre deux problèmes liés à cet effet.

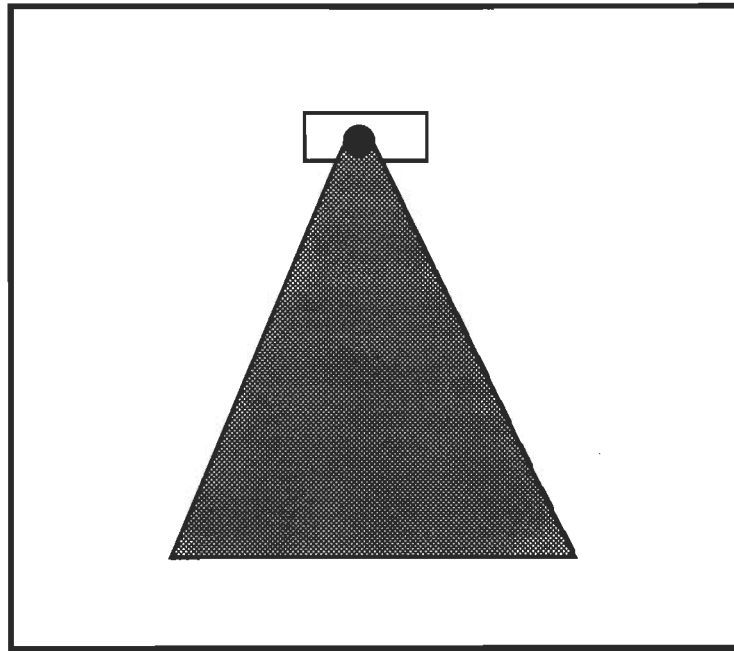


Figure V.5- Cône d'émission des US.

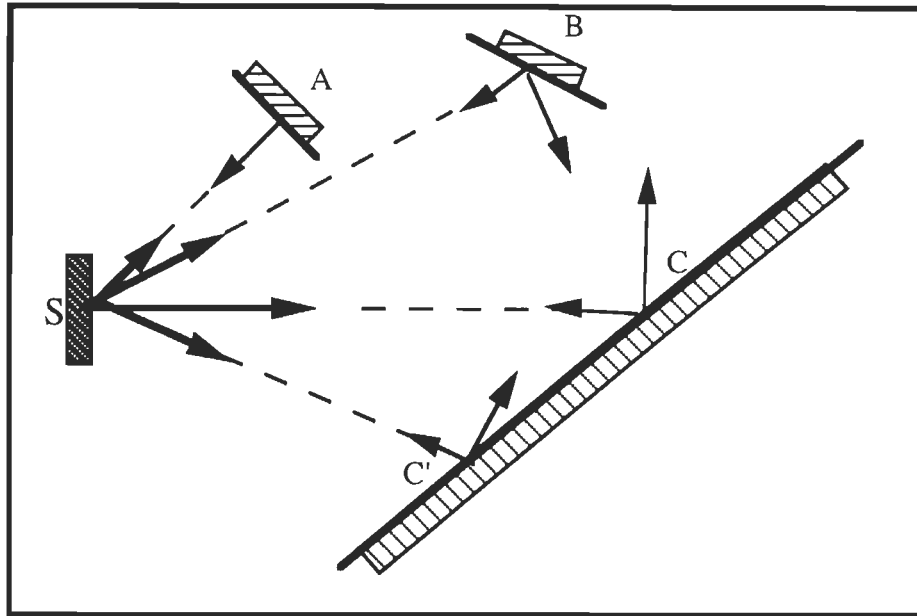


Figure V. 6- Incertitude directionnelle pour plusieurs obstacles à angle d'émission élevée du cône

- l'obstacle A, situé à la limite du cône acoustique, reçoit uniquement une faible quantité d'énergie de la source. Cependant, son orientation est perpendiculaire aux ondes sonores incidentes ce qui en résulte une réflexion optimale.
- l'obstacle B, reçoit plus d'énergie de la source S puisqu'il est plus près de l'axe acoustique, alors que la réflexion est faible à cause de son orientation non favorable.

Il en découle de ces deux cas qu'il n'est pas évident lequel des obstacles est détecté. Un autre problème similaire apparaît au niveau de C et C'. Dans ce cas, C est sur l'axe acoustique alors qu'il possède une orientation moins favorable que celle de C'. Dans ces conditions, ni la direction, ni la distance à l'obstacle ne peuvent être déterminées avec précision.

*Comment peut on minimiser l'effet de ces problèmes ?*

On peut remédier à ces problèmes en améliorant la directionnalité du transducteur ce qui veut dire rendre le cône d'émission plus étroit. Ceci peut se faire en inserant des éléments spéciaux tels que des lentilles acoustiques.

D'autre part, dans notre application de robot mobile il est indispensable pour nous de détecter l'existence d'obstacles au sol tel que le bord du trottoir. Une solution consiste en l'utilisation de deux transducteurs placés à un angle de 45 degrés avec l'horizontale, comme le montre la figure V.7. Ceci entraîne un nouveau problème puisqu'il augmente l'incertitude dans les mesures de la direction des obstacles.

En effet, en détectant le côté A, le robot mesure la distance SA qui est nettement supérieure à l'actuelle distance entre le robot et l'obstacle. Ce qui introduit des imprécisions additionnelles dans la localisation de l'objet d'une distance non négligeable.

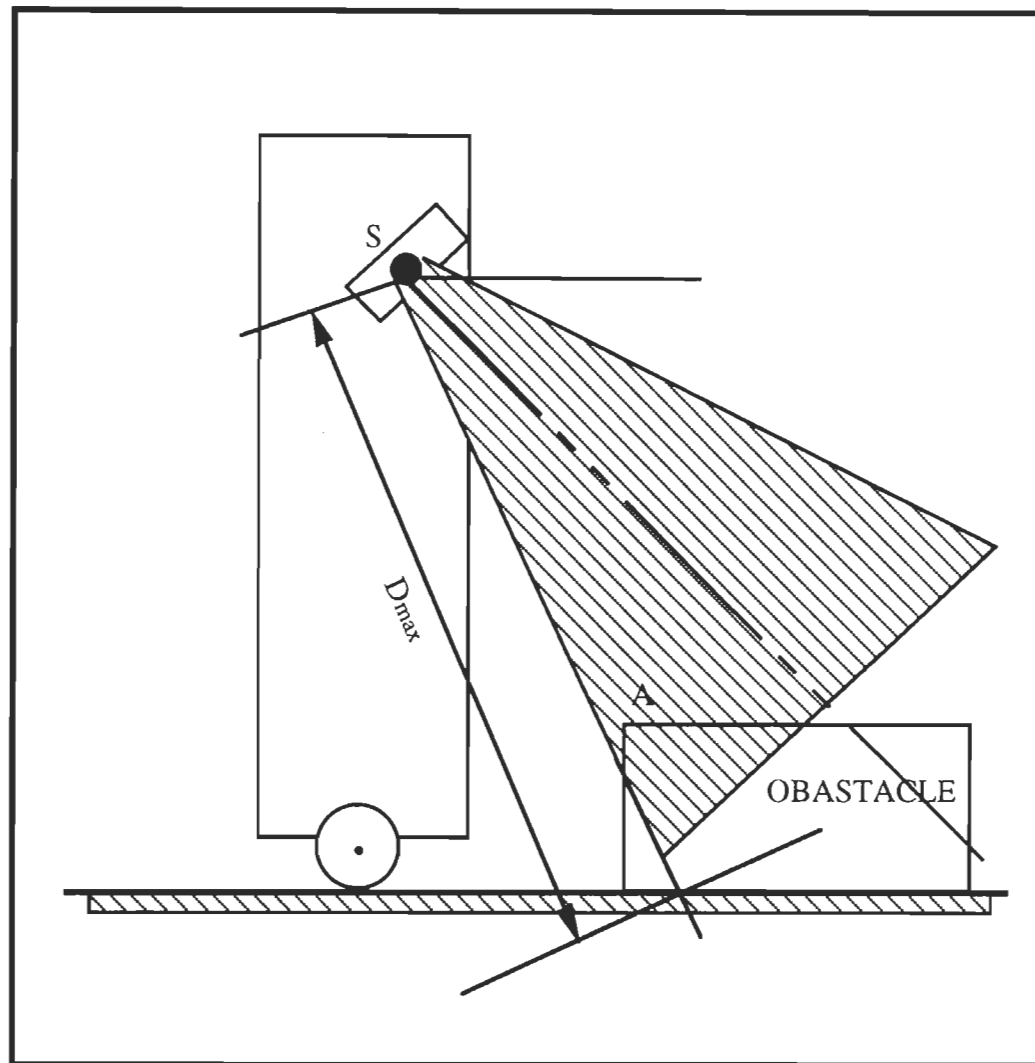


Figure V.7- Nouveau problème d'incertitude

Un autre problème peut aussi se présenter et qui peut ainsi allourdir la situation, pour des raisons de dissimulation dans le cas d'une confusion possible avec d'autre transmissions issues des autres robots voisins ou bien dans le cas où les informations relatives à la couleur et à la réflexion sont importantes.

## II.2 Odométrie

Parmi les systèmes de mesure autonomes de la position et de l'orientation d'un RM, les méthodes utilisant les informations de la vitesse produisent une petite erreur de direction. L'accumulation de ces erreurs entraîne des trajectoires imprécises pour le véhicule lors d'un déplacement de longue distance. Les erreurs augmentent cumulativement au fur et à mesure que le robot se déplace.

En plus l'odométrie possède plusieurs sources d'erreurs:

- Les ondulations et la rugosité de la surface peuvent causer une sur-estimation de la distance parcourue,
- Le dérapage cause une sous-estimation de la distance parcourue,
- les variations de la charge peuvent distordre les roues odométriques ce qui introduit des erreurs additionnelles;
- le compteur d'impulsions compte les impulsions générées dans une unité de temps  $dt$ , une erreur de 1 bit est introduite par comptage ce qui entraîne une distance additionnelle de l'ordre de 0.8 mm.
- Le sol n'est pas parfaitement horizontal et contient des pentes et des ondulations ce qui provoque une distorsion de la position et de l'orientation du RM.
- plusieurs autres problèmes doivent être pris en considération pour réduire leurs effets, tel que l'effet de l'environnement sur le système, l'effet du

déplacement le long des rampes sur les senseurs, l'effet du mouvement du robot sur les senseurs...

## **II.3 Vision**

Le système de vision humaine et les robots mobiles dotés de vision (même à trois-dimensions) ne visualisent pas une scène réelle de la même manière. La scène est vue comme un ensemble de surfaces planes et de courbes avec plusieurs ambiguïtés dues aux ombres et aux recouvrements d'objets. Comme des effets varient avec l'angle de prise de vue et les conditions d'illumination, il en résulte des risques importants d'erreurs d'interprétation. Une autre source d'erreur réside dans la résolution du pixel qui est toujours faible malgré les grands efforts de recherche dans le domaine de la vision afin de développer des systèmes très précis. Ce problème peut introduire des erreurs qui peuvent nuire au bon fonctionnement et par la suite il a fallu tenir compte de ces points pour augmenter le concept d'autonomie du robot mobile.

## **II.4 Télémétrie par triangulation**

Que ce soit dans le cas des dispositifs à triangulation active ou passive, ces systèmes possèdent beaucoup de sources d'erreurs. En effet, en ce qui concerne la deuxième (passive), la déflexion du faisceau est obtenue par l'intermédiaire d'un miroir tournant. Ce qui introduit des erreurs liées à l'aspect mécanique. D'autre part, il y a le problème de la précision de la mesure et de la déviation angulaire du faisceau.

Dans ce type de triangulation la troisième dimension est obtenue par une simple triangulation classique ceci introduit plusieurs autres sources d'erreurs telles que la nécessité de la connaissance parfaite des paramètres des deux caméras (azimuts, site et position) ce qui conduirait à des relations de transformation de coordonnées non-linéaires entre les systèmes d'axes des deux caméras. Un point situé sur l'une des images doit être localisé avec une très grande précision sur l'autre; ce qui n'est pas toujours facile à faire et peut conduire à de grosses erreurs. Le pas de numérisation et la précision numérique des calculs influencent beaucoup la qualité des mesures.

Dans le cas de la reconnaissance d'objet, cette méthode ne permet pas de s'affranchir des lumières parasites, des reflets et des états de surfaces. D'autre part, la discontinuité dans la précision des mesures dépend de la distance séparant les deux caméras et de la taille de recouvrement des champs de vision.

## **II.6 Conclusion**

De cette analyse plus ou moins détaillée des différentes sources d'erreurs associées au système sensoriel utilisé pour la perception et la localisation du robot, on peut retirer les constatations suivantes:

- On ne peut pas augmenter le concept d'autonomie pour notre robot mobile si on ne trouve pas un moyen pour améliorer la qualité des mesures. La connaissance appropriée des différentes sources d'erreurs associées à ce système sensoriel nous permettra d'intervenir au niveau des capteurs afin de compenser l'effet des sources d'erreurs majeures qui peuvent entraîner la



dérive du robot et dégrader la qualité de contrôle du système global. C'est le cas de l'effet des ondulations et des pentes sur l'odométrie, adoptée par notre système, ainsi que de l'effet de la variation de la charge du robot. Ceci fera l'objet de la prochaine section de ce chapitre.

- Afin d'améliorer la précision de la localisation du robot on peut avoir recours à la technique de recallage qui consiste à mettre à jour, périodiquement, la position du robot ainsi que son orientation par le biais d'équipements externes placés dans l'environnement et qui serviront de référence pour le robot. Cette technique, par sa nature, s'oppose au concept de l'autonomie du robot qui devient maintenant dépendant de l'existence et de l'absence de ces équipements. Il est vraie qu'à l'état actuel de la recherche on n'est pas capable d'éviter cette technique malgré son inconvénient majeur, mais on a pensé à diminuer la fréquence de cette correction ce qui veut dire augmenter l'autonomie du robot. Le moyen technologique qui s'est imposé est l'utilisation des techniques de filtrage non-linaire de l'état du robot afin d'en extraire la localisation la plus précise. Cette technique couplée avec les solutions précédentes de compensation de l'effet des irrégularités dans le sol et de l'effet des variations de la charge appliquée au robot permettront d'atteindre nos objectifs à savoir:

- obtension d'un robot autonome,
- diminution de la fréquence de la correction périodique de la position.

- une autre solution qui s'avère nécessaire à adopter pour minimiser les inconvénients de chaque capteur pris isolément. Elle consiste à coupler les informations obtenues à partir de différents capteurs, qui fournissent chacun des informations naturellement complémentaires. De cette façon, on peut minimiser l'influence des inconvénients de chacun d'eux pris isolément tout en valorisant leurs avantages.

### **III. TECHNIQUES DE COMPENSATION**

#### **III.1 COMPENSATION DE L'EFFET DES ONDULATIONS ET DES RAMPES: Estimation du couple développé par le moteur d'entraînement**

##### **III. 1.1 Position du problème**

On a déjà mentionné que l'une des grandes limitations du système de localisation par odométrie est l'existence d'ondulations et d'inclinaisons dans la structure du sol. Ceci va entraîner des erreurs qui vont s'accumuler au fur et à mesure du déplacement du robot.

Dans le but de minimiser ces erreurs, pour ne pas dire les éliminer, il a fallu trouver un moyen qui permet de compenser l'effet des inclinaisons et des ondulations sur la précision de la mesure de la position et de l'orientation du robot dans son environnement.

On a constaté après des calculs précis que le couple développé par le moteur d'entraînement du véhicule est dépendant de l'inclinaison de la surface du sol. Ceci nous a amené à penser à estimer le couple fourni par le

moteur pour en déduire l'inclinaison équivalente du sol pour faire la compensation qui s'avère nécessaire. La relation qui lit le couple développé et l'angle d'inclinaison sera présentée dans cette section, alors que la description de la technique d'estimation fera l'objet du séminaire 3.

### III. 1.2 Mise en équations

Lors du déplacement du robot, il y a trois cas qui se présentent:

- déplacement sur un plan parfaitement horizontal,
- déplacement le long d'une rampe dans le sens croissant (vers le haut),
- ou le déplacement le long d'une rampe dans le sens décroissant (vers le bas).

En supposant que le frottement est constant et est égale à  $p_0$ , on peut trouver les relations suivantes:

#### III.1.2.1 Cas d'un mouvement sur un plan horizontal

La relation fondamentale de la dynamique ou deuxième loi de Newton se pose comme suit:

$$\Sigma F_i = \Sigma m_i \gamma_i \quad (1)$$

Or, dans notre application , le robot se déplace à une vitesse constante  $V=V_0$  ce qui veut dire que l'accélération est nulle  $\gamma_i=0$

L'équation (1) devient alors:

$$\Sigma F_i = 0 \quad (2)$$

ce qui donne:

$$\vec{F} + \vec{P} + \vec{f} = \vec{0} \quad (3)$$

Où:

F est la force de traction, P le poids du véhicule et f le frottement résultant.

En projetant la relation (3) sur les axes x et y ( voir figure V.8),

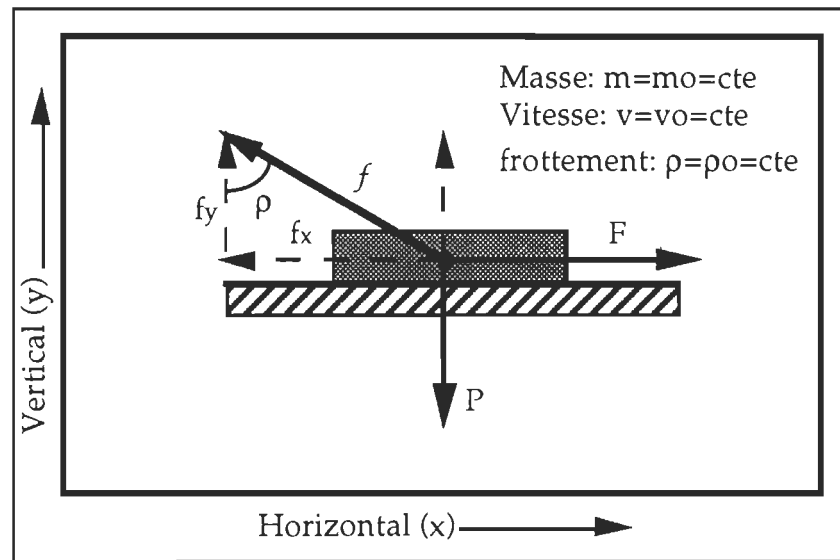


Figure V.8- Cas du déplacement horizontal ( angle d'inclinaison β est nul)

on obtient:

$$F_x - f_x + 0 = 0 \quad (4)$$

$$+ f_y - P_y = 0 \quad (5)$$

$$f_x = f_y \cdot \tan \rho \quad (6)$$

ce qui donne la force motrice nécessaire pour déplacer le robot à une vitesse constante à savoir:

$$F = m.g.tg\rho \quad (7)$$

### III.1.2.2 Cas d'un mouvement sur une pente vers le haut

De la même façon que précédemment, la projection sur les axes x et y

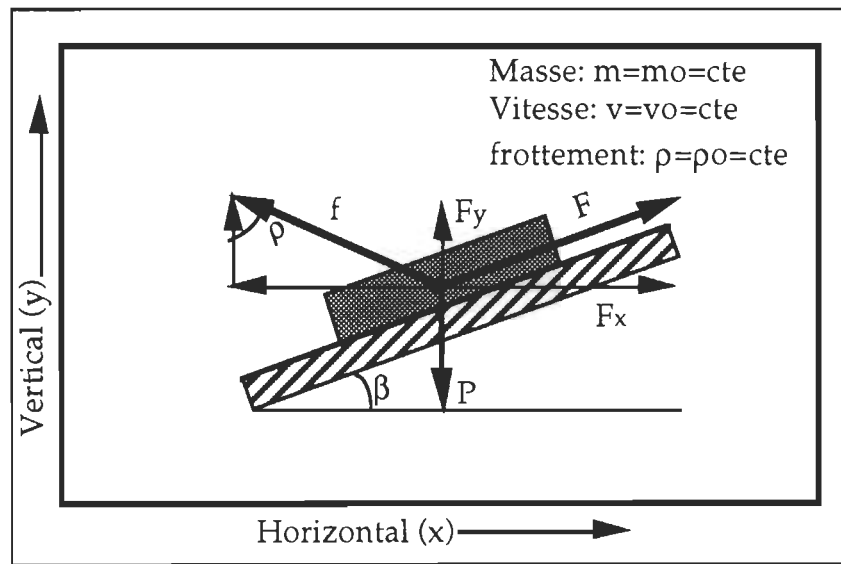


Figure V.9- Cas du déplacement le long d'une pente vers le haut ( $\beta \neq nul$ )

donne,

$$f_x = f_y . tg\rho \quad (7)$$

$$F_x = f_x \quad (8)$$

$$P_y = f_y + F_y \quad (9)$$

$$F_y = F_x . tg\beta \quad (10)$$

On en retire l'expression des deux composantes de la force  $F$  à savoir:

$$F_y = \frac{\tan(\beta)\tan(\rho)}{1 + \tan(\beta)\tan(\rho)} \cdot P \quad (11)$$

$$F_x = \frac{\tan(\beta)\tan(\rho)}{1 - \tan(\beta)\tan(\rho)} \cdot P \quad (12)$$

D'où l'expression de la force de traction nécessaire pour faire déplacer le robot à une vitesse constante:

$$F = \frac{\sin(\rho)}{\cos(\rho - \beta)} \cdot P \quad (13)$$

### III.1.2.3 Cas d'un mouvement sur une pente vers le bas

De la même façon que précédemment, la projection sur les axes  $x$  et  $y$

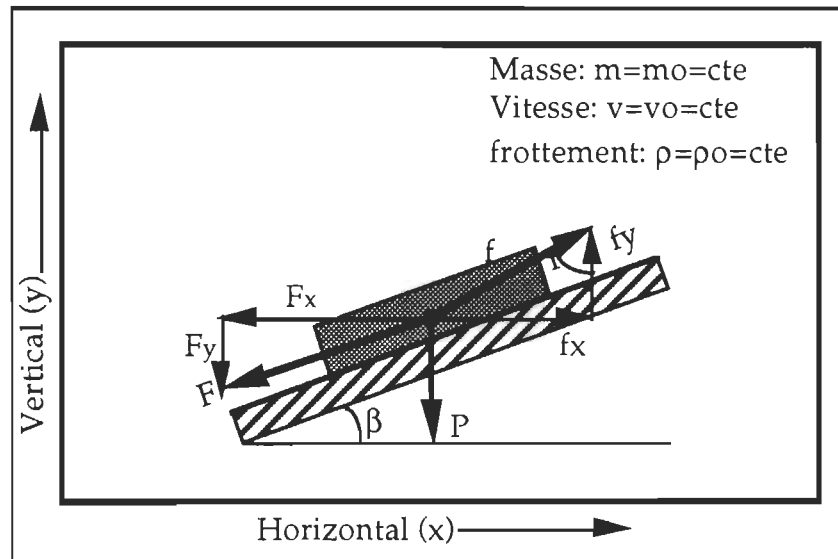


Figure V.10- Cas du déplacement le long d'une pente vers le bas ( $\beta \neq \text{nul}$ )

donne,

$$f_x = \tan \rho \cdot f_y \quad (14)$$

$$f_x - F_x = 0 \quad (15)$$

$$f_y - P_y - F_y = 0 \quad (16)$$

$$F_y = F_x \cdot \tan \beta \quad (17)$$

On en retire l'expression des deux composantes de la force F à savoir:

$$F_y = \frac{\tan(\beta)\tan(\rho)}{1 - \tan(\beta)\tan(\rho)} \cdot P \quad (18)$$

$$F_x = \frac{\tan(\beta)\tan(\rho)}{1 - \tan(\beta)\tan(\rho)} \cdot P \quad (19)$$

D'où l'expression de la force de traction nécessaire pour faire déplacer le robot à une vitesse constante:

$$F = \frac{\sin(\rho)}{\cos(\rho+\beta)} \cdot P \quad (20)$$

Dans les trois cas, les équations ainsi obtenues montrent la dépendance de la force motrice nécessaire pour maintenir la vitesse du moteur de l'angle d'inclinaison. L'utilisation d'un estimateur de couple permet de déduire cette variation de l'angle d'inclinaison et par la suite de retrouver le vraie déplacement du robot à savoir:

$$D_{\text{exact}} = \frac{D_{\text{mesuré}}}{\sin(\beta)} \quad (21)$$

### III.1.3 Description de l'estimateur de couple

Pour l'estimation des paramètres d'un processus ou de grandeurs quelconques ( couples, forces, courants, ...) on a recours , dans la plupart des applications, à la méthode récursive des moindres carrés (RLS identification).

#### III.1.3.1 Mise en équations

La dynamique du système électromécanique peut être représenté en utilisant le modèle standard.

Notre moteur d'entraînement du véhicule ayant une inertie  $J$ , peut être représenté par les équations suivantes,

$$L \frac{di}{dt} + Ri(t) + K_e \omega(t) = v(t) \quad (22)$$

$$J \frac{d\omega}{dt} + B \omega(t) = K_t i(t) - T_d \quad (23)$$

où  $R$ ,  $L$ ,  $K_t$ ,  $K_e$ ,  $B$ ,  $v$ ,  $i$  et  $T_d$  représentent respectivement, la résistance, inductance, constante du couple, constante de la force électromagnétique, facteur d'amortissement, tension appliquée, le courant dans l'armature et le couple de perturbation.

La transformation de cette équation dans le plan de Laplace donne l'équation suivante:

$$\omega(s) = \frac{K_1^* v(s) - K_2^* (s + G^*) T_d(s)}{s^2 + a_1^* s + a_2^*} \quad (24)$$



La fonction de transfert équivalente en  $z$ , utilisant un bloqueur d'ordre zéro, donne la relation entre la vitesse, tension et le couple perturbant:

$$\omega(z) = \frac{K_1 (z+b_1)V(z) - K_2(z + c_1) T_d(z)}{z^2 + a_1z+a_2} \quad (25)$$

### II. 1.3.2 Estimation du couple

Les équations dynamiques discrètes du système de l'équation (25) peuvent s'écrire dans le domaine temporel utilisant l'équation récursive suivante, où  $b_i$  sont les paramètres du système.

$$\omega(k+1) = b_1\omega(k) + b_2\omega(k-1) + b_3v(k) + b_4v(k-1) + b_5T_d(k) + b_6T_d(k-1) \quad (26)$$

Le système d'équation peut se mettre sous la forme d'une notation vectorielle comme suit:

$$\omega(k+1) = \Phi^T(k) b(k) \quad (27)$$

où:

- $\Phi$ : vecteur des signaux de commande
- $b$ : vecteur des paramètres

Si on suppose que la perturbation est constante sur une période d'échantillonnage, c'est-à-dire

$$T_d(k) = T_d(k-1) \quad (28)$$

on combine les deux termes de l'équation (26) pour former un seul terme d'offset. Ce terme inconnu peut être inclu dans les paramètres  $b_i$  du système.

Il faut maintenant estimer les paramètres du vecteur  $\Phi$  des signaux de commande ainsi que le vecteur  $b$  des paramètres .

Ce problème d'estimation sera résolu en ayant recours à la méthode d'estimation réursive des moindres carrés étendue (*ERLS*) ou bien l'utilisation de l'algorithme *Approximate maximum likelihood* (AML). Si les propriétés de la distribution du bruit apporté par la perturbation sont bien connus, l'estimé issu de la deuxième méthode présente une convergence meilleure à celle des moindres carrés étendue. En absence de cette connaissance, les deux estimateurs présentent des propriété équivalentes.

La simplicité de l'algorithme du *ERLS* et l'absence de la connaissance des propriétés du bruit nous ont fait choisir cet algorithme.

Le schéma récursif d'estimation est donné par les équations suivantes, qui sont similaires aux équations du filtre de Kalman dans le cas d'une estimation linéaire.

$$\hat{b}(k+1) = \hat{b}(k) + B(k+1) \cdot [w(k+1) - \Phi^T(k) \cdot \hat{b}(k)] \quad (29)$$

où :  $\hat{b}$  représente l'estimé

$B$  représente le gain du filtre

Du fait que les éléments de  $\Phi$  ne sont pas tous connus, les éléments inconnus  $T_d(k-1)$  et  $T_d(k)$  sont remplacés par leur *séquence résiduelle*.

La séquence résiduelle de  $T_d(k)$  est obtenue à partir de la version suivante de l'équation (26):

$$\begin{aligned} \widehat{T}_d(k-1) = & \widehat{b}_5(k)^{-1} \cdot [w(k) - \widehat{b}_1(k) \cdot w(k-1) + \widehat{b}_2(k) \cdot w(k-2) \\ & - \widehat{b}_3(k) \cdot v(k-1) - \widehat{b}_4(k) \cdot v(k-2) - \widehat{b}_6(k) \cdot \widehat{T}_d(k-2)] \end{aligned} \quad (30)$$

Les paramètres utilisés dans cette équation sont obtenus par les estimés de l'équation (28).

Les estimés de  $T_d(k)$  dans le vecteur  $F$  de l'équation (28) sont remplacés par  $\widehat{T}_d(k)$ , issus de l'équation (29).

Les équations récursives nécessaires pour déterminer le vecteur gain  $B$  sont similaires à celle du filtre de Kalman, à savoir

$$\begin{aligned} B(k+1) &= P(k) \cdot \Phi(k) + [1 + \Phi(k)^T P(k) \Phi(k)] \\ P(k+1) &= [I - B(k+1) \cdot \Phi(k)] \cdot P(k) \end{aligned} \quad (31)$$

où  $P(k)$  est la matrice de covariance, telle que  $P(0)$  est égale à une matrice diagonale.

Avec cet algorithme on arrive à estimer le couple développé par le moteur d'entraînement du véhicule pour compenser l'effet de l'existence des ondulations et des pentes dans la surface.

### III. 1.3.3 Simulation et résultats

L'algorithme décrit dans la section précédente a été simulé par PC-Matlab. La variation de la charge a été simulée par une incrémentation croissante de l'effort développé.

Les résultats de l'estimation ont montré que l'estimateur réagit très bien et rapidement aux variations comme le montre la courbe de la figure V.11.

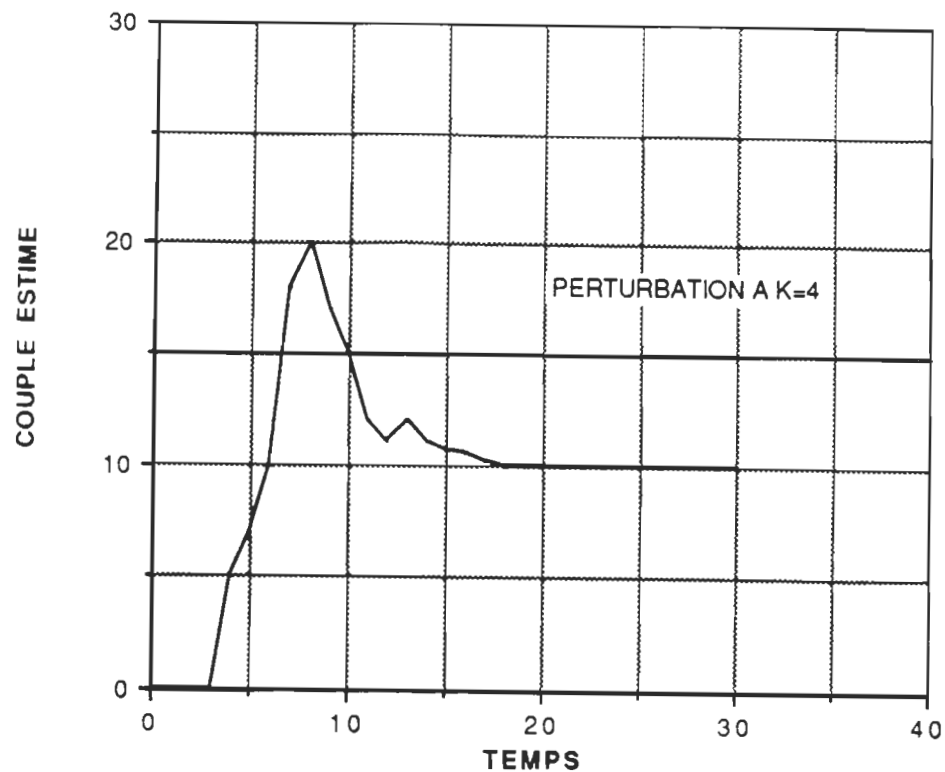


Figure V.11- Réponse de l'estimateur de couple

Cette courbe montre que l'estimateur fonctionne parfaitement et donne un temps de réponse acceptable pour une telle application. Ainsi en estimant les variations du couple on peut déduire l'erreur équivalente en position ce qui nous permettra de la compenser.

## III.2 COMPENSER L'EFFET DE LA VARIATION DE LA CHARGE: Estimation des rayons des roues odométriques

### III.2.1 Introduction

La technique de localisation du robot mobile en position et en orientation utilisant la technique de l'odométrie basée sur les informations de vitesse issues des roues libres est fortement sensibles aux déformations dans les rayons des roues odométriques. Une analyse des causes principales de cette déformation montre que se sont les variations dans la charge qui contribuent le plus à cette déformation. Pour cela on a pensé, dans le but de réduire les sources d'erreurs qui nuisent au bon fonctionnement autonome du robot mobile, à estimer les rayons des deux roues odométriques et corriger par la suite la distance parcourue.

### III. 2.2 Mise en équations

Les distances parcourues correspondant à une impulsion générée par l'encodeur optique ne sont pas égales même sous des conditions de pression identiques. Ce problème est dû principalement à la variation de la charge. Ce qui constitue une nouvelle source d'erreur du fait que la technique de l'odométrie est très dépendante de cette déformation.

Lors du déplacement du véhicule, les distances parcourues  $\Delta l_d$  et  $\Delta l_g$  relatives à chaque roue sont données par:

$$\begin{aligned}\Delta l_d &= D_d.N_d \\ \Delta l_g &= D_g.N_g\end{aligned}\tag{32}$$

où:

- $D_d, D_g$ : distances parcourues relatives à chaque impulsion issue de l'encodeur optique gauche ou droite
- $N_d, N_g$ : nombres d'impulsions générées dans une période de temps  $T$ .

Ainsi, la distance parcourue  $\Delta l$  et la variation de l'orientation  $\Delta \theta$  du véhicule sont obtenues à partir des relations suivantes:

$$\begin{aligned}\Delta l &= \frac{\Delta l_d + \Delta l_g}{2} \\ \Delta \theta &= \frac{\Delta l_g - \Delta l_d}{b}\end{aligned}\tag{33}$$

Ainsi que les coordonnées,  $X_n$ ,  $Y_n$  et  $\theta_n$ , correspondant à chaque instant  $t_n$ , sont fonction de  $D_d, D_g$ .

Par conséquent, il sera nécessaire d'estimer les rayons de chaque roue odométrique par une certaine méthode qu'on exposera plus tard, et corriger par la suite  $D_d, D_g$  en accord avec les nouveaux rayons estimés.

Si on suppose que les charges appliquées aux roues odométriques varient lentement, les rayons effectifs,  $r_d$  et  $r_g$ , peuvent être déterminés en utilisant les déplacements de la suspension arrière gauche et droite du véhicule,  $\delta_d$  et  $\delta_g$ , comme le montre les équations suivantes (figure V.12):

$$\begin{aligned}r_g &= r_{g0} - k_g \cdot \delta_g \\ r_d &= r_{d0} - k_d \cdot \delta_d\end{aligned}\tag{34}$$

où : •  $r_{g0}, r_{d0}$ : rayon en état d'équilibre quand  $\delta_g = \delta_d = 0$ ,

- $k_d, k_g$ : constantes

Ainsi, quand la charge est appliquée, les distances  $D_d, D_g$  sont compensées par les équations suivantes:

$$\begin{aligned} D_g &= D_{g0} - K_g \cdot \delta_g \\ D_d &= D_{d0} - K_d \cdot \delta_d \end{aligned} \quad (35)$$

où: •  $D_{g0}, D_{d0}$ : distances parcourues relatives à une impulsion de l'encodeur gauche ou droit quand  $\delta_d$  et  $\delta_g$  sont nulles

- $\delta_g, \delta_d$ : déplacement de la suspension arrière gauche et droite du véhicule quand applique la charge aux roues.

- $K_g, K_d$ : constantes déterminées par expérimentation.

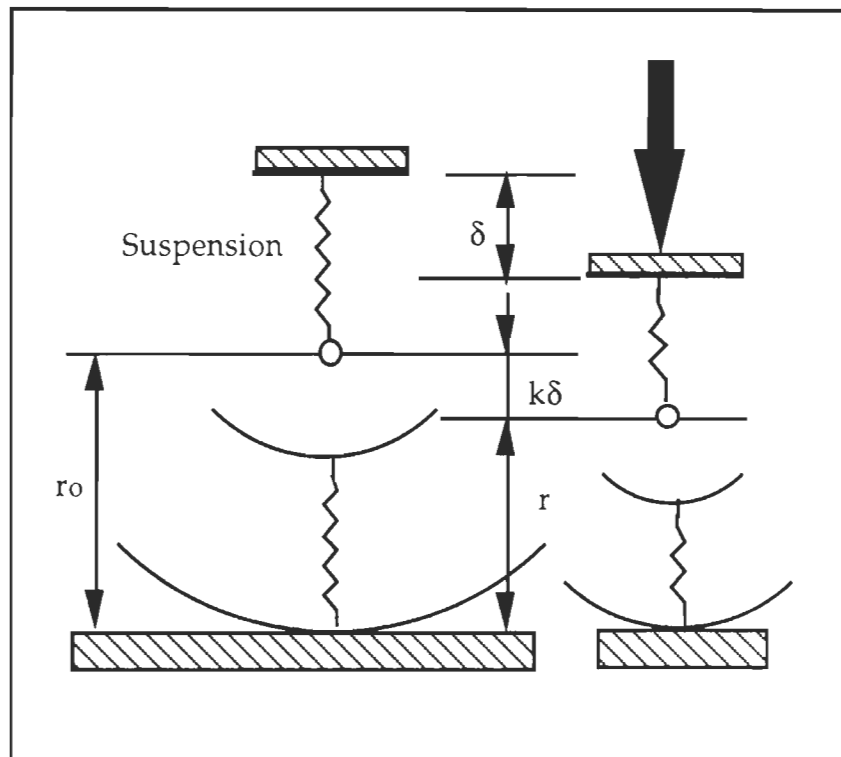


Figure V.12- Principe de la compensation de la variation de la charge.

De cette manière on arrive à obtenir des valeurs de  $D_d, D_g$  qui sont grandement précises ce qui améliore fortement la précision relative à la localisation du robot.

### **III.3 MÉTHODE DE COMPENSATION DE L'ERREUREN POSITION ET EN DIRECTION: recallage du robot mobile autonome**

#### **III.3.1 Introduction**

La possession d'un système de mesure précis de la position et de la direction est une composante essentielle pour les systèmes-robots mobiles autonomes.

Dans notre RM on a opté un système de mesure qui assure une grande flexibilité et liberté dans les déplacements du robot mobile. Il s'agit de l'odométrie basée sur la mesure de la vitesse des deux roues folles sans aucun soutien extérieur.

Cependant ce système est sujet à plusieurs sources de petites erreurs qui s'accumulent au fur et à mesure que le robot se déplace. Ce qui entraîne la distorsion de la localisation de robot.

Dans le but de réaliser le trajet le plus long possible, il a fallu éliminer ces erreurs en adoptant la technique de correction périodique de la localisation. Cette technique est basée sur l'utilisation de faisceaux Laser placés sur le véhicule et des bandes réfléchissantes placées le long du chemin de parcours projeté.



### III.3.2 Principe de la correction

Tout au long et perpendiculairement au parcours on place des paires de plaques réfléchissantes  $(L_i, R_i)$ . Les coordonnées de ces plaques réfléchissantes ainsi que la largeur  $L$  du chemin de parcours sont bien connues dans le repère cartésien  $(O, X_E, Y_E)$ .

D'autre part et comme le montre la figure V.13, les faisceaux  $S_1$  et  $S_2$ , placés au point  $P_f$  distant de  $W_1$  de  $P$  point représentatif du véhicule, sont émis perpendiculairement à la direction du véhicule. Alors que les faisceaux  $S_3$  et  $S_4$ , placés au point  $P$  distant de  $P_f$  d'une distance  $W$ , sont émis avec respectivement, un angle  $\alpha_r$  et  $\alpha_l$  par rapport à la direction du véhicule.

Au cours du mouvement du véhicule, les faisceaux  $S_1$  et  $S_3$  vont traverser la plaque réfléchissante  $R_k$  alors que les deux autres,  $S_2$  et  $S_4$ , traverseront la plaque  $L_k$ . De cette façon l'ensemble de photo-senseurs placé seront capable de détecter les faisceaux réfléchis par les plaques.

La méthode compensationnelle proposée ici est développée sous l'hypothèse que le véhicule se déplace tout droit où tous les faisceaux  $S_1, S_2, S_3$  et  $S_4$  traversent une paire de plaques réfléchissantes  $(R_k, L_k)$ . Ainsi la trajectoire du véhicule peut être représentée comme celle illustrée par la figure V.14.

Dans cette figure, on exprime le point  $P$  représentatif du véhicule comme  $PS_1, PS_2, PS_3$  et  $PS_4$ , et de plus,  $PF$  ou  $PR$  comme  $P'S_1, P'S_2, P'S_3$  et  $P'S_4$ .

Maintenant on se propose de considérer le nouveau système de coordonnées orthogonal  $[L_k; X_k Y_k]$  ayant comme origine le point  $L_k$  ( voir fig.V 14).

1) En premier lieu on se propose de déterminer la direction  $\theta_c$  du véhicule dans le repère  $[L_k; X_k Y_k]$  en utilisant une distance parcourue par le véhicule entre deux passages par deux plaques réfléchissantes  $(R_k, L_k)$  de  $S_1$  et  $S_2$ . De sorte qu'on aura:  $l_{12} = \overline{PS_1 PS_2}$  et la direction  $\theta_c$  est calculée comme suit:

$$\theta_c = A \sin\left(\frac{l_{12}}{L}\right) \quad (36)$$

où le signe de  $l_{12}$  est défini positif quand  $S_2$  traverse  $L_k$  avant que  $S_1$  traverse  $R_k$ .

2) Par la suite, on se propose de déterminer les coordonnées  $(x_c, y_c)$  dans le repère  $[L_k; X_k Y_k]$ . Ces coordonnées représentent la position du véhicule  $PS_j$  ( $j=1, 2, 3$  ou  $4$ ), dans laquelle un faisceau, au moins, traverse une plaque réfléchissante.

Dans ce système de coordonnées, les équations de  $S_3$  et  $S_4$  qui viennent juste de traverser, respectivement,  $R_k$  et  $L_k$  sont comme suit:

$$S_3: y_k = \text{Cotan}(\alpha_r + \theta_c).(x_k - L) \quad (37)$$

$$S_4: y_k = - \text{Cotan}(\alpha_l - \theta_c).x_k \quad (38)$$

Ainsi, les coordonnées  $(x, y)$  de l'intersection  $P$  de  $S_3$  et  $S_4$  sont données par :

$$x = \frac{L \cdot \tan(\alpha_l - \theta_c)}{\tan(\alpha_r + \theta_c) + \tan(\alpha_l - \theta_c)} \quad (39)$$

$$y = - \frac{L}{\tan(\alpha_r + \theta_c) + \tan(\alpha_l - \theta_c)} \quad (40)$$

De plus, le véhicule mesure une distance parcourue  $l_{34}$  entre deux passages de  $S_3$  et  $S_4$  par deux plaques réfléchissantes:  $l_{34} = \overline{PS_3PS_4}$

Par la suite on peut calculer la distance  $PP'S_3$  en utilisant la loi des sinus dans  $\triangle PP'S_3P'S_4$  ce qui donne:

$$PP'S_3 = l_{34} \sin \frac{L}{\sin(\alpha_r + \alpha_l)} \quad (41)$$

où le signe de  $l_{34}$  est défini positif quand  $S_4$  traverse  $L_k$  avant que  $S_3$  traverse  $R_k$ .

Les coordonnées  $(x_{S_3}, y_{S_3})$  de la position  $PS_3$  du véhicule sont obtenues à partir de l'équation suivante:

$$XS_3 = x + PP'S_3 \sin(\alpha_r + \theta_c) \quad (42)$$

$$YS_3 = y + PP'S_3 \cos(\alpha_r + \theta_c) \quad (43)$$

Par conséquent, les coordonnées  $(x_c, y_c)$  se déterminent de la façon suivante:

$$x_c = XS_3 + (l_{3j} + W - W_1) \sin(\theta_c) \quad (44)$$

$$y_c = YS_3 + (l_{3j} + W - W_1) \cos(\theta_c) \quad (45)$$

où  $l_{3j}$  est la distance parcourue par le véhicule entre  $PS_3$  et  $PS_j$ .

En fin, la position  $(X_c, Y_c)$  et la direction  $\Theta_c$  du véhicule dans le système de coordonnées  $(O, X_E Y_E)$  se détermine en utilisant les coordonnées  $(x_c, y_c)$  déjà calculées dans le système  $(L_k; X_k Y_k)$  et la relation de passage entre les deux systèmes de coordonnées.

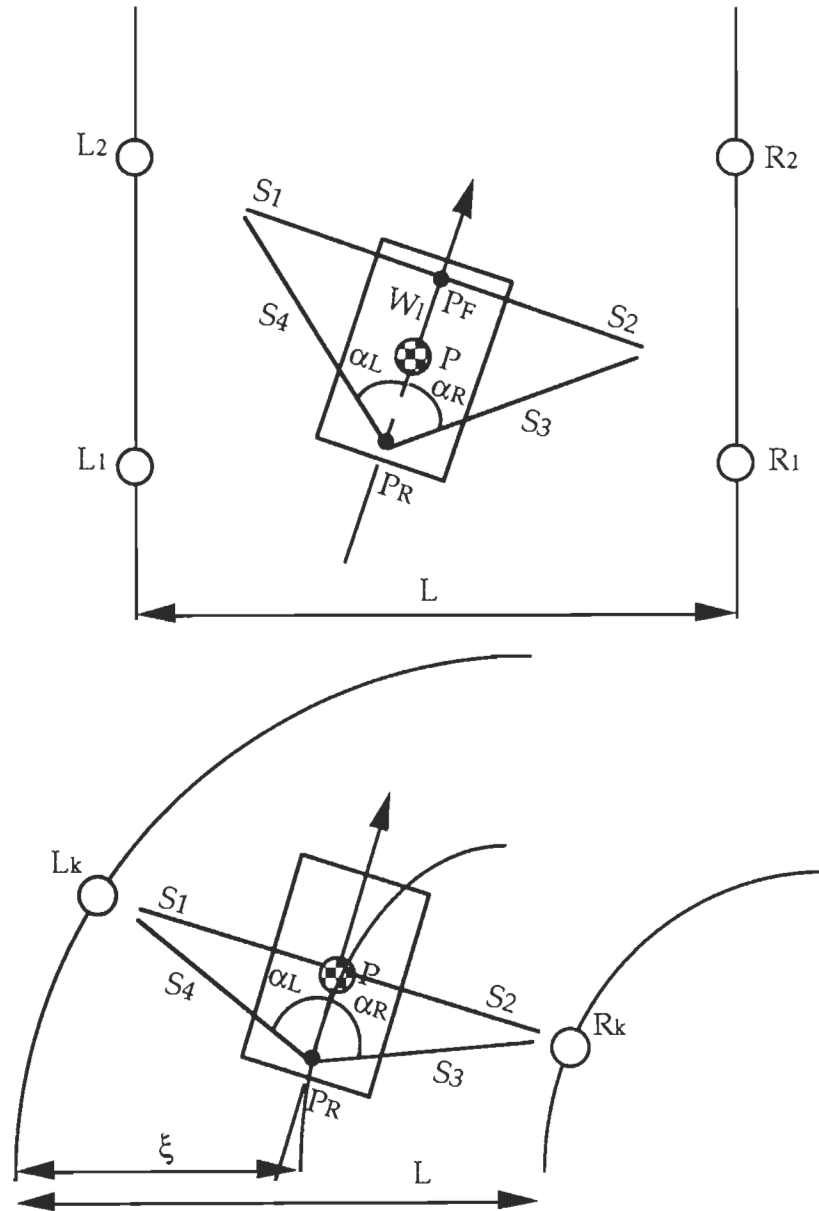


Figure V.13- Arrangement des plaques réfléchissantes et des sources

Ainsi, on arrive à compenser les erreurs de la position et de la direction causées par la méthode d'autolocalisation adoptée dans notre RM en substituant les coordonnées obtenues  $(X_c, Y_c)$  et  $\Theta_c$  à la place de  $(X_o, Y_o)$  et  $Y_o$ .

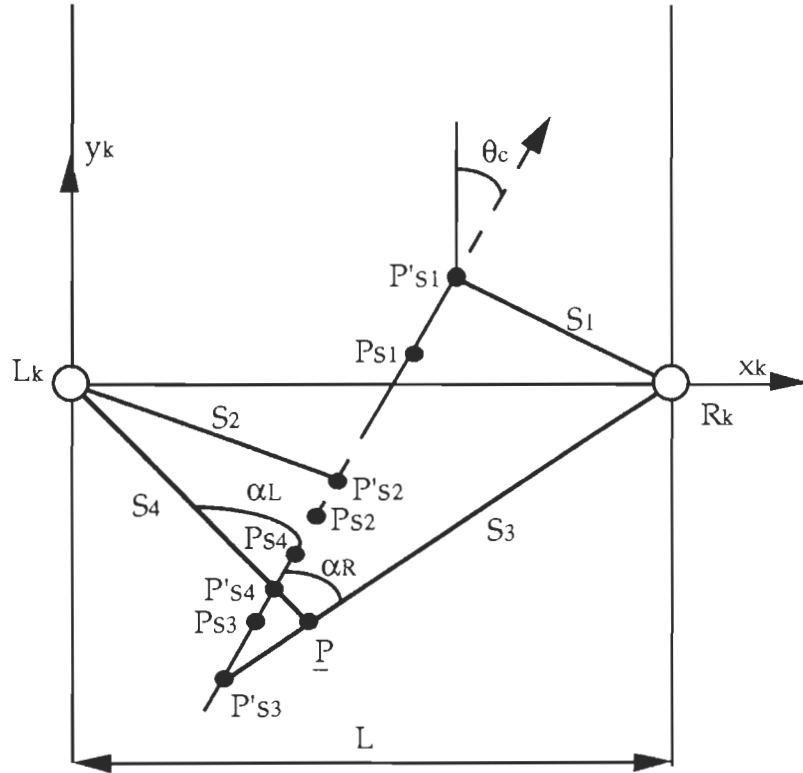


Figure V.14- Principe de la correction: type de trajectoire considérée

#### IV. FILTRAGE DE L'ETAT DU SYSTEME: Technique de filtrage non-linéaire

##### IV.1 Introduction et position du problème:

Comme on a déjà mentionné, le rôle d'un robot mobile, en tant que système capable d'agir sur son environnement, est d'accomplir de manière plus ou moins autonome les tâches qui lui sont confiées. Le degré

d'autonomie dépendant essentiellement de la durée de l'importance et de la nature de l'intervention de l'opérateur qui a la charge de piloter le robot.

Par sa nature la tâche principale pour un robot mobile est de se déplacer d'un endroit à un autre. Ce déplacement doit se faire de façon autonome sans opto ou filo guidage. Pour ce faire on a opté pour l'odométrie qui assure une grande liberté et manoeuvrabilité pour le robot. Ce système est malheureusement sujet à plusieurs sources d'imprécision qui s'accumulent au fur et à mesure que le robot se déplace.

Pour assurer le plus long parcours possible il était nécessaire d'utiliser une correction (recallage) périodique de la localisation du robot. Ce remède va à l'encontre du concept d'autonomie qu'on veut donner à notre robot. Il a fallu trouver un autre moyen pour réduire les sources d'erreurs associées à ce système de mesure afin de diminuer la fréquence de cette correction.

La section précédente a présenté les deux premières techniques qu'on a adopté. Il s'agit de:

- la compensation de l'effet des ondulations et des pentes ainsi que les irrégularités dans la surface du sol par le biais de l'estimation du couple développé par le moteur d'entraînement du véhicule,
- la compensation de l'effet des variations de la charge qui se manifestent en des déformations des roues (variation du rayon avec la charge) en estimant les variations dans les rayons des roues pour compenser leur effet sur la distance parcourue.

Il serait nécessaire de mentionner que ces deux techniques sont couplées. Ce qui demande d'être attentif pour ne pas tomber dans l'erreur. En effet, si une variation rapide de la charge provient, elle entraînera une variation du couple développé par l'unité d'entraînement ainsi qu'une déformation du rayon des roues. On aura l'impression que cette variation du couple est due à des irrégularités dans la surface du sol alors qu'elle est en réalité causée par des variations de charge.

Notre troisième intervention se manifeste dans le désir de minimiser la variance de l'état du système ainsi obtenue, causée par les incertitudes et des bruits liés au système sensoriel adopté ainsi qu'aux lacunes de la modélisation. Cette technique qui va permettre d'extraire précisément l'état du système, permettra d'obtenir une meilleure qualité de contrôle pour le système-robot mobile. Cette technique est basée sur l'utilisation de la théorie du filtrage non-linéaire.

Dans la prochaine section il sera question de la description des filtres utilisés.

## IV.2 Description des filtres

L'estimé optimal de l'état du véhicule, noté  $\hat{X}$ , est pris comme étant l'estimé à variance minimale. On peut facilement montrer que cet estimé est la moyenne de la "JOINT DENSITY FUNCTION" du vecteur d'état  $X$  conditionnée sur toutes les mesures antérieures  $Z(k)$ ,  $k = 1, \dots, N$ .

Si on considère que  $X$  et  $Z$  sont des vecteurs on peut écrire que:

$$\hat{X} = \int X_p(X/Z).dX \quad (46)$$

Kushner [5] a développé l'équation différentielle exacte décrivant l'évolution de la densité de probabilité  $p(X, Z)$ .

En effet, pour des problèmes linéaires et Gaussiens, les équations aboutissent à celles du filtre de Kalman-Bucy. Cependant, pour des problèmes d'estimation non-linéaires, comme c'est le cas ici, la solution exacte nécessite une représentation de dimension infinie. Ce qui rend le filtrage presque intouchable puisqu'il demande un calcul lourd et énorme.

Ce problème est résolu en utilisant les filtres sous-optimaux qui sont de dimension finie. Ces filtres sont heureusement de bonnes approximations pour la structure du filtre optimal.

Ces approches utilisent les techniques d'approximation en série de Taylor des non-linéarités de l'état et éventuellement de la mesure du système. Le point de développement étant pris comme étant le meilleur estimé disponible à cet instant. Seuls les premiers termes du développement sont retenus pour aboutir à des algorithmes qui seront traitables (du point de vue temps réel ...).

On va utiliser trois filtres non-linéaires approximés pour en retirer celui qui fourni la meilleure estimation de l'état du système. La simulation est dirigée pour déterminer:

- les effets de la non-linéarité de l'état du système sur la précision, et



- les performances relatives des trois filtres

Les trois filtres utilisés dans le cadre de ce travail sont :

- *le filtre de Kalman étendu (FKE),*
- *le filtre du second ordre (FSO),*
- *le filtre itératif de lissage linéaire (FILL)*

La formulation de ces trois filtres sera présentée dans la section qui suit. Pour une description plus détaillée des algorithmes, nous référons le lecteur aux références [7, 8].

#### IV. 2.1 Filtre de Kalman étendu (FKE)

Dans ce cas, la non-linéarité du système est développée autour de la prédiction de l'état à l'instant d'intérêt. On retient seulement le premier terme du développement ce qui donne la structure suivante:

En utilisant le modèle du système décrit par l'équation suivante:

$$\mathbf{x}(k+1) = \mathbf{f}(\mathbf{x}(k), \mathbf{u}(k)) + \mathbf{v}(k) \quad (47)$$

$$\mathbf{v}(k) \sim \mathbf{N}(0, \mathbf{Q}(k)) \quad (48)$$

où  $\mathbf{f}(\mathbf{x}(k), \mathbf{u}(k))$  est la fonction (non-linéaire) de transition

dont l'expression est:

$$f(x(k), u(k)) = \begin{pmatrix} R\omega(k)\cos(\alpha(k))\cos(\theta(k)) \\ R\omega(k)\cos(\alpha(k))\sin(\theta(k)) \\ \frac{R}{L}\omega(k)\sin(\alpha(k)) \end{pmatrix} \quad (49)$$

et connaissant le vecteur d'entrée  $u(k)$ , on prédit la nouvelle localisation du robot à l'instant  $k+1$ :

$$\hat{x}(k+1 | k) = f(\hat{x}(k | k), u(k)) \quad (50)$$

et on calcule par la suite la variance  $P(k+1 | k)$  associée avec cette prédiction:

$$P(k+1 | k) = \nabla f P(k | k) \nabla f^T + Q(k) \quad (51)$$

où  $\nabla f$  est le Jacobien de la fonction de transition d'état  $f(\hat{x}(k | k), u(k))$  obtenu en linéarisant autour de l'estimé actuel de l'état  $\hat{x}(k | k)$ .

Par la suite, pour chaque senseur on utilise la prédiction de la localisation du robot  $\hat{x}(k+1 | k)$  et le modèle de la mesure pour générer une prédiction de l'observation

$$\hat{z}(k+1) = h(\hat{x}(k+1 | k), u(k)) \quad (52)$$

La prédiction de l'état du système est utilisée pour calculer le Jacobien  $\nabla h$  de la mesure pour chaque prédiction afin de déterminer la covariance de la mesure. Cette covariance est calculée en linéarisant l'équation de mesure:

$$z_j(k) = h(x(k), u(k)) + w(k) \quad (53)$$

$$\text{où } w(k) \sim N(0, R(k)) \quad (54)$$

$$\mathbf{S}(k+1) = \nabla \mathbf{h} \mathbf{P}(k+1|k) \nabla \mathbf{h}^T + \mathbf{R}(k+1) \quad (55)$$

L'étape finale est d'utiliser les prédictions de l'état et de la mesure pour calculer,  $\hat{\mathbf{x}}(k+1|k+1)$  l'estimé actuel de l'état.

$$\hat{\mathbf{X}}(k+1/k+1) = \hat{\mathbf{X}}(k+1/k) + \mathbf{K}(k+1, \hat{\mathbf{X}}(k+1/k)) \cdot [z(k+1) - \mathbf{H} \cdot \hat{\mathbf{X}}(k+1/k)] \quad (56)$$

où:

$$\mathbf{K}(k+1, \hat{\mathbf{X}}(k+1/k)) = \mathbf{P}(k+1/k) + \mathbf{H}^T \cdot [\mathbf{H} \cdot \mathbf{P}(k+1/k) \mathbf{H}^T + \mathbf{R}]^{-1} \quad (57)$$

et

$$\mathbf{P}(k+1/k+1) = \mathbf{P}(k+1/k) \cdot [\mathbf{I} - \mathbf{K}(k+1, \hat{\mathbf{X}}(k+1/k))] \quad (58)$$

Dans les équations ci-dessus,  $\hat{\mathbf{X}}(k+1/k)$ , est la prédiction à l'instant  $k+1$ ,  $\mathbf{P}(k+1/k)$  est la covariance de la prédiction,  $\mathbf{K}$  est la matrice de gain du filtre,  $\hat{\mathbf{X}}(k+1/k+1)$  est l'estimé à l'instant  $k+1$ ,  $\mathbf{P}(k+1/k+1)$  est la covariance de l'estimé.

## IV. 2.2 Filtre du second ordre (FSO)

La structure de ce filtre est similaire à celle du FKE à l'exception qu'on a retenu les termes de second ordre dans le développement en série de Taylor. Il en résulte l'introduction d'un terme de correction et d'un terme additionnel dans l'équation de gain du filtre pour avoir la structure suivante:

$$\begin{aligned}
 \widehat{X}(k+1/k) &= \Phi(\widehat{X}(k/k), k) \cdot \widehat{X}(k/k) \\
 P(k+1/k) &= \Phi(\widehat{X}(k/k), k) \cdot P(k/k) \cdot \Phi^T(\widehat{X}(k/k), k) + Q \\
 K(k+1, \widehat{X}(k+1/k)) &= P(k+1/k) \cdot H^T \\
 &\quad \cdot [H \cdot P(k+1/k) \cdot H^T + R + L(k+1/k)]^{-1} \\
 \widehat{X}(k+1/k+1) &= \widehat{X}(k+1/k) + K(k+1, \widehat{X}(k+1/k)) \\
 &\quad \cdot [z(k+1) - H \cdot \widehat{X}(k+1/k) - B(k+1)] \\
 P(k+1/k+1) &= [I - K(k+1, \widehat{X}(k+1/k))] P(k+1/k) \\
 \text{où}
 \end{aligned}$$

$$B(k+1) = \frac{1}{2} \sum_{j=1}^n \Phi_j \text{trace}\{D_j(\widehat{X}(k+1/k)) P(k+1/k)\}$$

où  $\Phi_j$  est le vecteur base de l'espace de dimension  $n$ ,

$$\Phi_1 = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix}, \Phi_2 = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix}, \dots, \Phi_n = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 1 \end{bmatrix}$$

L'addition de ces termes produit des estimés qui ne sont plus biaisés au niveau du second ordre, de plus la covariance sera exacte jusqu'au second ordre.

#### IV. 2. 3 Filtre itératif de lissage linéaire (FILL)

Etant donné  $\widehat{X}(k/k)$  et  $P(k/k)$ , le FILL est formé des itérations suivantes:

$$\begin{aligned}\eta_{i+1} &= \widehat{X}(k+1/k) + K(k+1, \eta_i, \xi_i) \\ &\cdot [y_{k+1} - h(\eta_i, k+1) - M(k+1, \eta_i) \cdot \{\widehat{X}(k+1/k) - \eta_i\}] \\ \xi_{i+1} &= \widehat{X}(k/k) + S(k, \xi_i) \cdot [\eta_{i+1} - \widehat{X}(k+1/k)], \\ & i = 1, 2, \dots, l,\end{aligned}$$

$$\eta_1 = \widehat{X}(k+1/k); \xi_1 = \widehat{X}(k/k)$$

où

$$\overline{X}(k+1; \xi_i) = \xi_i + \int_k^{k+1} f(\overline{X}(\tau)) d\tau$$

$$\begin{aligned}\widehat{X}(k+1/k) &= \overline{X}(k+1; \xi_i) + \Phi(k+1, k; \xi_i) \\ &\cdot [\widehat{X}(k/k) - \xi_i]\end{aligned}$$

ainsi

$$\begin{aligned}\widehat{X}(k+1/k+1) &= \eta_l, \\ P(k+1/k+1) &= [I - K(k+1; \eta_l, \xi_l) \cdot M(k+1; \eta_l)] \\ &\cdot P(k+1/k; \xi_l) \cdot [I - K(k+1; \eta_l, \xi_l) \cdot M(k+1; \eta_l)]^T \\ &\cdot K(k+1; \eta_l, \xi_l) \cdot R(k+1) \cdot K^T(k+1; \eta_l, \xi_l).\end{aligned}$$

### IV.3 Simulation et résultats

Dans le chapitre précédent, on a déterminé le modèle cinématique du robot mobile. Il s'est présenté sous la forme d'un système d'équations non-linéaires. Dans cette expression on a introduit les bruits associés à ce modèle pour donner le système stochastique suivant:

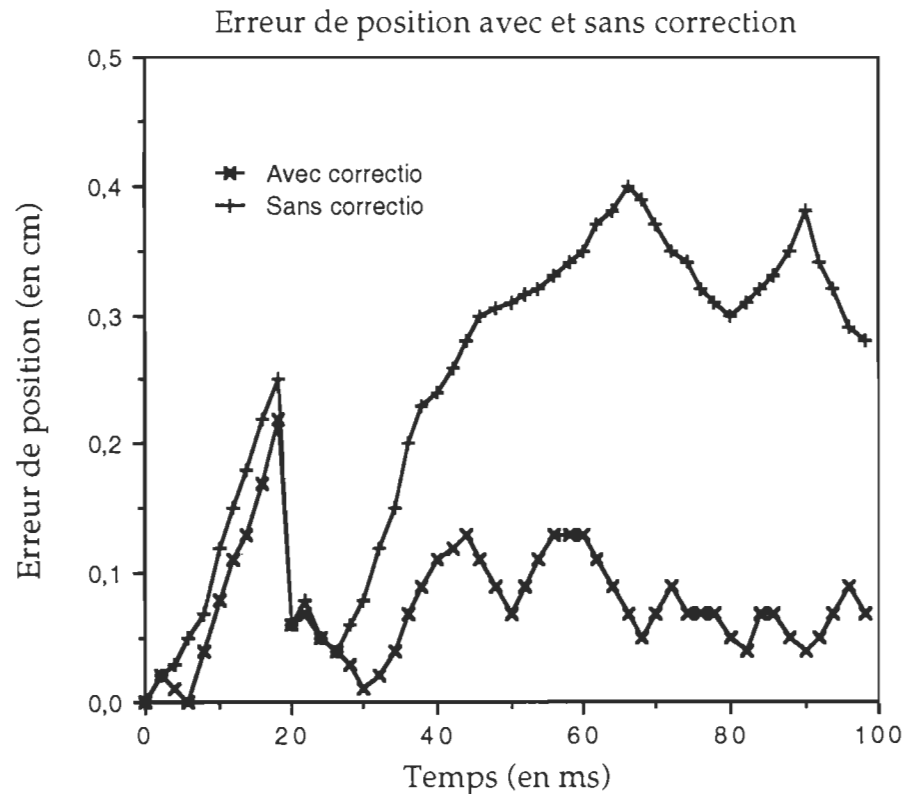
$$\dot{X} = f(X, t) + w(t)$$

avec:  $w(t)$  un bruit blanc, Gaussien et à moyenne nulle.

En ce qui concerne l'équation de l'observation, elle se présente sous une forme linéaire associée à une séquence de bruit blanc, Gaussien et à moyenne nulle.

où  $H$  est une matrice identité et  $\mu_k$  une séquence de bruit blanc, gaussien à moyenne nulle. Il faut toutefois mentionner qu'on a considéré que les deux bruits du modèle et de la mesure sont indépendants l'un de l'autre.

Différentes simulations avec différents estimateurs ont été réalisées. Dans un premier temps on a fait une série de simulation avec le FKÉ en faisant varier les conditions initiales des matrices de variance. Les résultats obtenus montrent que la moyenne carrée de l'erreur en position et en orientation diminuent grâce à ce filtre ce qui représente en soi le but recherché par cette phase de notre travail. La figure V.15, illustre ce résultat.



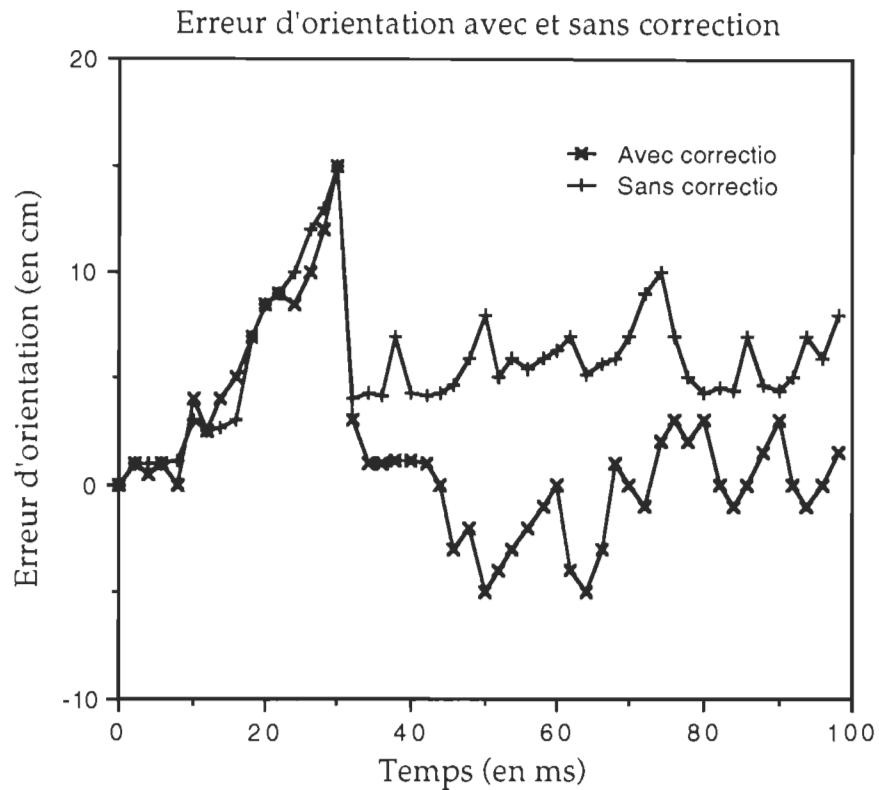
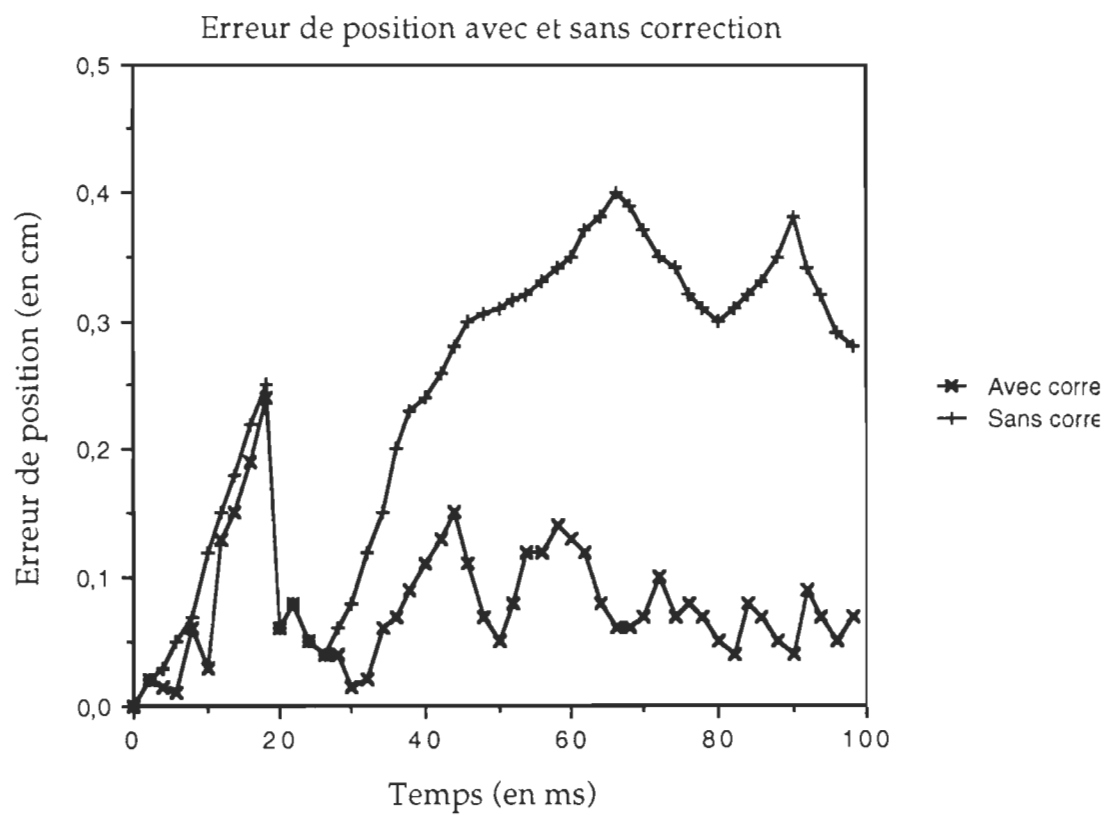


Figure V.15- Résultats de simulation du FKÉ

La même procédure de simulation a été entreprise avec le second filtre à savoir le filtre du second ordre (FSO). On s'attendait à ce qu'il nous fournisse un résultat meilleur que celui du FKÉ, c'est ce qu'on a observé. Cependant le temps de calcul pris par la simulation pour atteindre l'objectif était nettement supérieur à celui de la FKÉ. Ce qui veut dire en terme d'implantation un temps de calcul très grand ce qui entraîne un problème de temps réel. La figure V.16, illustre un exemple de résultat issu de ce filtre.





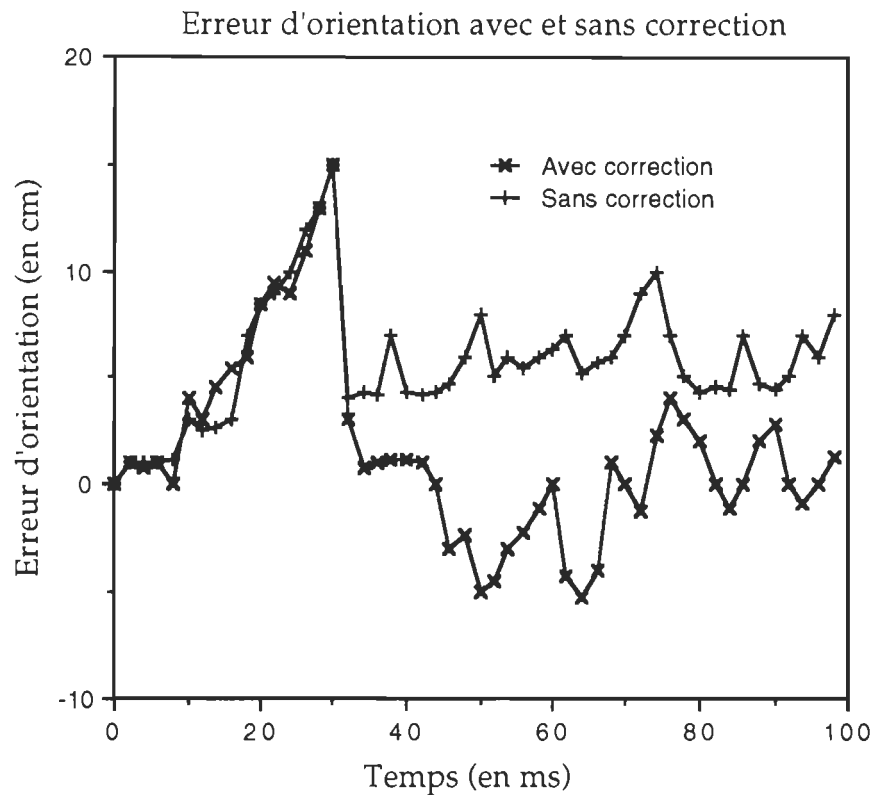
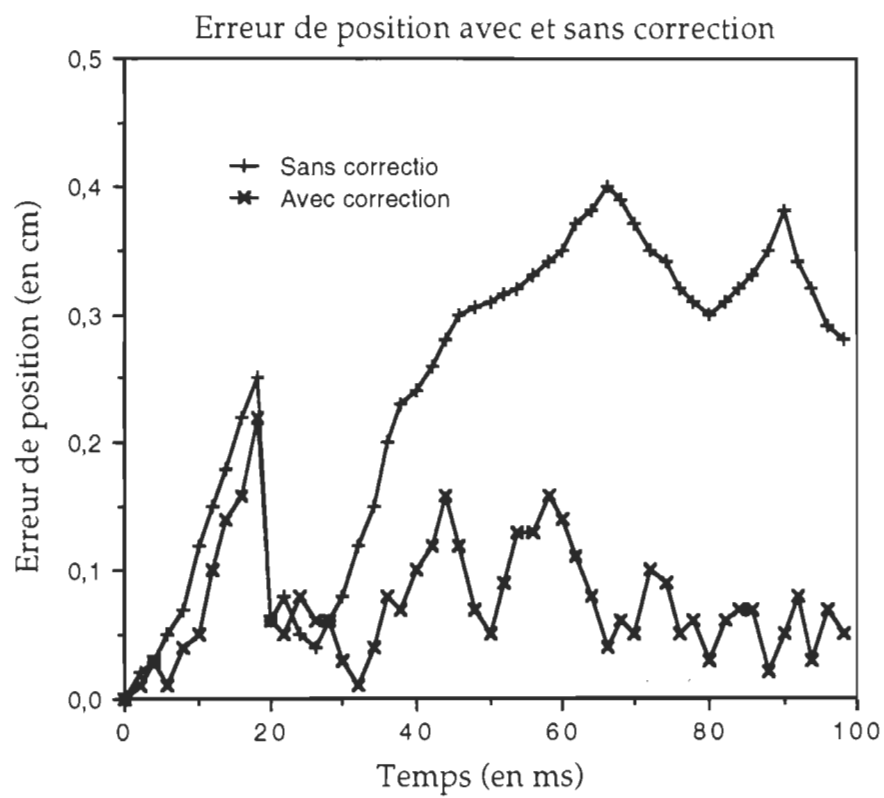


Figure V.16- Résultats de simulation du FSO

En ce qui concerne le troisième filtre en question à savoir le FILL, lui aussi a produit une erreur en position et en orientation légèrement meilleure que celle du FKÉ, mais il a nécessité lui aussi un temps de calcul plus grand que celui demandé par le FKÉ. Le figureV.17 montre un exemple des résultats obtenus par simulation pour ce type de filtre



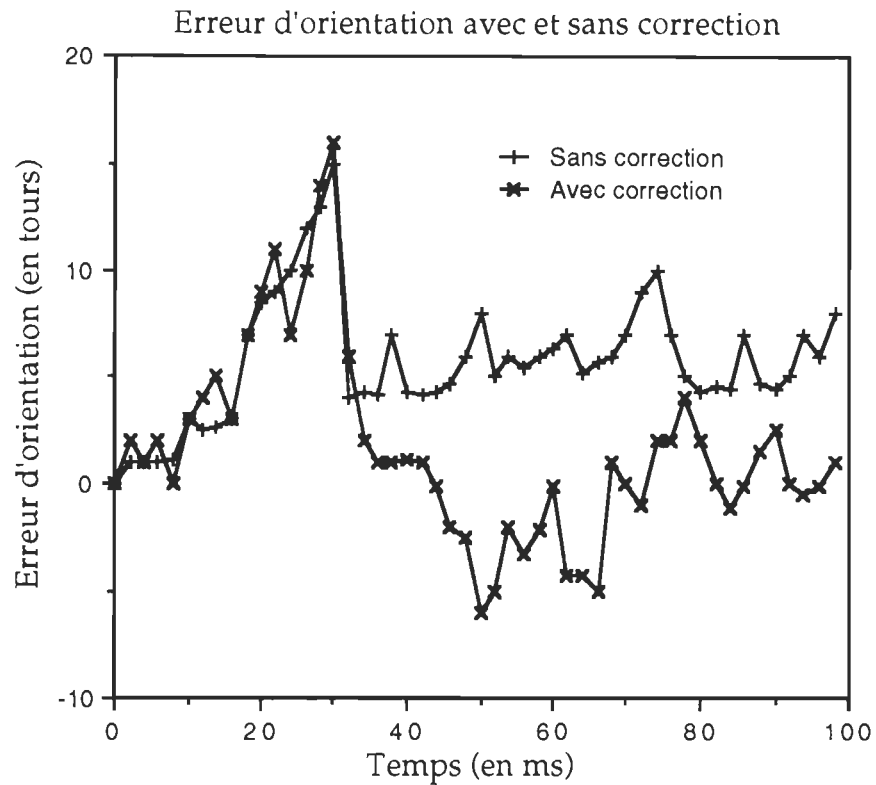


Figure V.17- Résultats de simulation du FILL

#### IV.4 Conclusion

Compte tenu des performances relatives des trois filtres en question du point de vue erreur en position et en orientation et temps de calcul on a choisi le FKÉ puisque les trois filtres ont présenté des performances équivalentes en ce qui concerne l'erreur. C'est le temps de calcul plus court qui a justifié son choix.

---

# CONCLUSION GÉNÉRALE

---

Le travail présenté dans cette thèse a été réalisé au sein du groupe de recherche en électronique industrielle (GRÉI) de l'Université du Québec à Trois-Rivières.

Il présente une contribution dans deux domaines de la robotiques mobiles sur l'amélioration de l'aspect autonomie d'un robot mobile en augmentant la précision de sa localisation ce qui veut dire la précision du système sensoriel et sur le pilotage. Ceci permet d'améliorer les performances du système de contrôle pour le suivi de la trajectoire de référence du robot.

Pour ce faire, on a présenté, dans un premier temps, une décomposition fonctionnelle du robot mobile. Cette décomposition présente le robot sous une forme modulaire. Ce qui permet de mieux comprendre les problèmes liés à ce domaine de recherche.

Dans une seconde partie, on a exposé les diverses approches utilisées par les chercheurs qui ont traité et qui traitent le problème des robots mobiles.

On a défini en suite dans le chapitre 3 le cadre de notre travail en présentant le robot mobile développé au GRÉI.

Notre contribution au projet se situe en deux temps. Le premier, au niveau de l'amélioration de la précision de la localisation. Pour ce faire on a utilisé des techniques de compensation des sources d'erreurs associées aux système sensorielle adopté par notre robot mobile.

La deuxième partie de notre contribution consiste en l'étude du système de contrôle du suivi et de la traction qui sera implanté sur notre système. Ce schéma se présente sous forme modulaire ce qui nous a permis de développer et étudier les problèmes liés à chaque unité.

Les deux dernières parties de cette thèse ont été consacrées d'une part, à la modélisation et à la commande et d'autre part aux différentes techniques adoptées pour améliorer la précision de l'état du système.

Nous avons tout d'abord présenté un modèle qui décrit le mouvement du robot. Ce modèle est de nature non-linéaire ce qui nous a poussé à utiliser les techniques de filtrage non-linéaire pour extraire l'état précis du système. Ceci permet au robot d'effectuer le chemin le plus long possible sans avoir recours à la technique de recallage qui va à l'encontre du concept d'autonomie qu'on veut donner à notre robot mobile.

A l'issue de tous nos travaux menés sur ce sujet, les suites qui s'imposent pour le développement du système sont de deux types:

- implantation des systèmes développés,

- amélioration de l'aspect décisionnel du robot.

---

# RÉFÉRENCES

---

- [1] J. ALEXANDER and J.MADDOCKS, " On the Kinematics of wheeled Mobile Robots," In I.J. Cox and G.T. Wilfong, editors, *Autonomous Robot Vehicles*, Springer-Verlag, 1990
- [2] R.Smith and Cheeseman," On the representation and estimation of spacial uncetainty," *Proceedings of IEEE International Journal of Robotics Research*, 5(4), 1987
- [3] J. BORENSTEIN and Y. KOREN, " Obstacle Avoidance with Ultrasonic Sensors," *IEEE Journal of Robotics and Automation*, Vol. 4, N° 2, Avril 1988
- [4] W.L. NELSON, " Continuous Steering-Function Control of Robot Carts," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 36, N° 3, Aout 1989
- [5] R.C. ARKIN and R.R. MURPHY, " Autonomous Navigation in a Manufacturing Environnemen," *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, Vol. 6, N° 4, Aout 1990
- [6] N.G. BOURBAKIS et al, " *NAUTILUS- An Autonomous Navigation System and its Simulation*," *IECON*, 1987

- [7] A. C. GELB, " Applied Optimal Estimation", MIT Press, 1973
- [8] A. JAZWINSKI, " Stochastic Processes and Filtering Theory," Academic Press, 1970.
- [9] C. CONNOLLY et *al*, " Matching from 3-D range models into 2-D intensity scenes," Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation, pages 65-72, 1987
- [10] M. DRUMHELLER, " Mobile Robot Localization using SONAR," IEEE Transactions on Pattern analysis and Machine Intelligence, PAMI-9(2):325-332, Mars 1987
- [11] D. BALLARD and C. BROWN, " Computer Vision," Prentice-Hall, 1982
- [12] P. MUIR, " Modeling and Control of Wheeled Mobile Robots," Thèse de Doctorat, CMU, 1988
- [13] T.H. WATERMAN, " Animal Navigation," Scientific American Library, 1989
- [14] R.B. TILOVE, "Local Obstacle Avoidance for Mobile Robots based on the Method of Artificial Potentials," IEEE International Conference on Robotics and Automation, 1990
- [15] H.W. SORENSON, " Least-Squares Estimation: from Gass to Kalman, " IEEE Spectrum, 7(7):63-68, Juillet 1970
- [16] A.M. WAXMAN et *al*, " A Visual Navigation System for Autonomous Land Vehicles," IEEE Journal of Robotics and Automation, Vol. RA-3, N° 2, pp. 124-141, Avril 1987
- [17] R.L. MADARASZ, " The Design of an Autonomous Vehicle for the Disabled," IEEE Journal of Robotics and Automation, Vol. RA-2, N° 3, pp. 117-126, Septembre 1986



- [18] H. WALKER, " Ultrasonic Presence Sensors with Wide Range and High Local Resolution," IEEE International Conference on Automation and Robotics, pp. 1281-1287, 1987
- [19] L. D. HOSTELLER, " Nonlinear Kalman Filtering Techniques for Terrain-Aided Navigation," IEEE Transactions on Automatic Control, Vol. AC-28, N° 3, pp. 315-323, 1983
- [20] J. TAN and N. KYRIAKOPOULOS, " Implementation of Tracking Kalman Filter on a Digital Signal Processor," IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 35, N° 1, pp. 126-134, 1988
- [21] L. MATTHIES and S.A. SHAHER, " Error Modeling in Stereo Navigation," IEEE Journal of Robotics and Automation, Vol. RA-3, N° 3, pp. 239-248, Juin 1987
- [22] K.C. DRAKE *et al*, " Experimental Position and Ranging Results for a Mobile Robot," IEEE Journal of Robotics and Automation, Vol. RA-3, N° 1, pp. 31-42, Février 1987
- [23] M.R. KABUKA and A.E.ARENAS, " Position Verification of a Mobile Robot Using Standard Pattern," IEEE Journal of Robotics and Automation, Vol. RA-3, N° 6, pp. 505-516, Décembre 1987
- [24] D.J.KRIEGMAN *et al*, " Stereo Vision and Navigation in Buildings for Mobile Robots," IEEE Transactions on Robotics and Automation, Vol. 5, N° 6, pp. 117-126, Décembre 1989
- [25] S. LANG *et al*, " Characterizing and Modelling a Sonar Ring," Proceedings of SPIE Conference on Mobile Robots IV, pp. 291-304, 1989